

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Ekonomické frézování rovinných ploch

Economical Milling of Planar Surfaces

Student: Bc. Lucie Vojtíšková

Osobní číslo: VOJ0082

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Ostrava 2020

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Lucie Vojtíšková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Ekonomické frézování rovinných ploch**
Economical Milling of Planar Surfaces
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika daného problému.
2. Technologie frézování.
3. Nové metody výkonového frézování.
4. Vlastní návrh řešení daného problému.
5. Diskuze experimentů.
6. Technicko-ekonomické zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:


BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha : MM publishing, s. r. o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

Tato práce byla vypracována se souhlasem společnosti Dormer Pramet, s.r.o., Uničovská 2, Šumperk.

V Ostravě dne: 18.5. 2020


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne:

18.5.2020

.....
Podpis studenta

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VOJTÍŠKOVÁ, L. *Ekonomické frézování rovinných ploch*: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2020, 72 stran, vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, Ph.D.

Cílem diplomové práce je analýza současného stavu v oblasti sortimentů nástrojů pro ekonomické frézování rovinných ploch a nástrojů s úhlem nastavení $\kappa_r = 45^\circ$.

První část diplomové práce popisuje proces výroby VBD, jejich možné opotřebení a povrchovou úpravu. Následuje charakteristika obráběných materiálů a jejich mechanické a chemické vlastnosti a také kapitola o technologii čelního frézování.

Hlavní část diplomové práce je zaměřena na experimentální porovnávací funkční a trvanlivostní zkoušky vyměnitelných břitových destiček od firmy Dormer Pramet s.r.o s dvěma dalšími konkurenty. Závěrečná část práce je věnována technicko-ekonomickému vyhodnocení dosažených výsledků u obráběných zkoušek.

Klíčová slova: čelní frézování, Ekonomické frézování rovinných ploch, Dormer Pramet.

ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

VOJTÍŠKOVÁ, L. *Economical Milling of planar surfaces*: Master Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical Engineering, Assembly and Engineering Metrology, 2020, 72 p., Thesis head: doc. Ing. Vladimír Vrba, Ph.D.

The aim of the thesis is to analyze the current state of the range of tools for economic milling of planar surfaces and tools with an angle of $\kappa_r = 45^\circ$.

The first part of the Master thesis describes the process of indexable inserts production, their possible wear and surface treatment. The following are the characteristics of machined materials and their mechanical and chemical properties, as well as a chapter on face milling technology.

The main part of the Master thesis is focused on experimental comparative functional and durability tests of indexable inserts from the company Dormer Pramet s.r.o with two other competitors. The final part of the work is devoted to the technical and economic evaluation of the results obtained in the machined tests.

Keywords: face milling, Economical milling of planar surfaces, Dormer Pramet.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
CAD	počítačem podporované projektování (computer-aided design)	[-]
CAM	počítačová podpora obrábění (computer-aided manufacturing)	[-]
CNC	počítačem řízený systém (computer numerical control)	[-]
ČSN	československá státní norma	[-]
CVD	chemická metoda depozice povlakových vrstev (chemical vapour deposition)	[-]
HSC	vysokorychlostní obrábění (high speed cutting)	[-]
HSR	vysokorychlostní hrubovací obrábění (high speed roughing)	[-]
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci (international organization for standardization)	[-]
NO	nástrojová ocel	[-]
M	skupina označení materiálů	[-]
P	skupina označení materiálů	[-]
PVD	fyzická metoda depozice povlakových vrstev (physical vapour deposition)	[-]
SK	slinutý karbid	[-]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
A	tažnost	[%]
a_e	radiální hloubka řezu	[mm]
a_p	axiální hloubka řezu	[mm]
D, \varnothing	průměr nástroje	[mm]
D_f	efektivní řezný průměr	[mm]
F_c	celková řezná síla	[MPa]
f	posuv	[mm · min ⁻¹]
f_z	posuv na zub	[mm · zub ⁻¹]
k_{ci}	měrná řezná síla	[MPa]
n	otáčky vřetena stroje	[ot · min ⁻¹]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
R_a	střední aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]

Rz	maximální výška nerovnosti profilu určená z 10 bodů	[μm]
v_c	řezná rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
Z	počet zubů frézy	[-]
Z_z	počet zubů v záběru	[-]
κ_r	úhel nastavení	[°]
X/Y/Z	osy souřadného systému	[-]

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	- 6 -
Úvod	- 10 -
1 Obecná charakteristika daného problému.....	- 11 -
1.1 Společnost Dormer Pramet s.r.o.....	- 11 -
1.2 VBD a slinuté karbidy	- 11 -
1.2.1 Proces výroby slinutých karbidů	- 12 -
1.2.2 Výroba prášku.....	- 13 -
1.2.3 Lisování polotovarů.....	- 13 -
1.2.4 Slinování.....	- 14 -
1.2.5 Finální úprava (broušení, povlakování).....	- 14 -
1.2.6 Povlakování.....	- 15 -
1.2.7 Tvorba povlaku metodou PVD a CVD	- 16 -
1.2.8 Systém značení VBD podle ISO.....	- 18 -
1.3 Charakteristika obráběných materiálů	- 18 -
1.3.1 Nástrojová ocel neboli NO.....	- 19 -
1.3.2 Korozivzdorná ocel	- 19 -
1.4 Rovinné frézy.....	- 20 -
2 Technologie frézování	- 21 -
2.1 Řezný proces a tvorba třísky.....	- 21 -
2.1.1 Řezný proces	- 21 -
2.1.2 Plastická deformace.....	- 21 -
2.1.3 Tvorba třísky.....	- 22 -
2.2 Řezné síly při čelním frézování	- 25 -
2.3 Opotřebení řezného nástroje	- 26 -
2.3.1 Mechanismy opotřebení	- 26 -
2.3.2 Klasifikace druhů opotřebení břitu nástroje	- 27 -
2.4 Metody frézování	- 28 -
2.4.1 Rovinné frézování.....	- 28 -
2.5 Čelní frézování.....	- 29 -
2.5.1 Běžné rovinné frézování.....	- 30 -
2.5.2 Volba nástrojů.....	- 30 -
2.6 Doporučené postupy u jednotlivých metod čelního frézování	- 32 -
2.6.1 Čelní frézování nesouvislých ploch s přerušovaným řezem.....	- 32 -
2.6.2 Čelní frézování tenkostěnných poddajných partií.....	- 32 -
2.6.3 Frézování obrysů tenkostěnných partií pomocí čelních fréz	- 33 -

3	Nové metody výkonového frézování.....	- 35 -
3.1	Trochoidní frézování.....	- 35 -
3.1.1	Výhody trochoidního frézování.....	- 36 -
3.2	Vysokorychlostní frézování.....	- 36 -
3.2.1	HSC	- 37 -
4	Vlastní návrh řešení daného problému	- 38 -
4.1	Dormer Pramet v porovnání s konkurencí.....	- 39 -
4.1.1	Dormer Pramet.....	- 39 -
4.1.2	Sumitomo.....	- 39 -
4.1.3	Palbit.....	- 40 -
4.2	Volba obráběcího stroje	- 41 -
5	Diskuze experimentů.....	- 42 -
5.1	Volba obráběného materiálu.....	- 42 -
5.1.1	Uhlíková ocel C45 (1.1191 / ČSN 12 050).....	- 42 -
5.1.2	Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349).....	- 43 -
5.2	Potřebné kontroly před začátkem zkoušky.....	- 44 -
5.2.1	Osazení fréz VBD.....	- 44 -
5.2.2	Měření tvrdosti obráběného materiálu	- 44 -
5.2.3	Axiální kontrola házivosti nástroje.....	- 46 -
5.3	Funkční zkoušky obrábění	- 49 -
5.3.1	Uhlíková ocel C45 (1.1191 / ČSN 12 050).....	- 49 -
5.3.2	Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349).....	- 54 -
5.4	Obráběcí zkouška na trvanlivost.....	- 60 -
6	Technicko-ekonomické zhodnocení.....	- 61 -
6.1	Vyhodnocení funkčních zkoušek.....	- 61 -
6.2	Ekonomické vyhodnocení z pohledu pořizovacích cen	- 62 -
	Závěr	- 63 -
	Použitá literatura	- 65 -
	Seznam obrázků.....	- 68 -
	Seznam tabulek	- 70 -
	Seznam grafů.....	- 71 -
	Seznam příloh.....	- 72 -

Úvod

V každé výrobní technologii jsou neustále kladeny nové požadavky na zvyšování produktivity, jakosti, přesnosti, efektivity, spolehlivosti apod.

Právě produktivita je jedním z nejvíce důležitých parametrů, na jejichž základě můžeme mezi sebou jednotlivé technologie srovnávat. Třískové obrábění si z pohledu produktivity konstantně drží velice významné postavení, jelikož je schopno zajistit všechny výše uvedené požadavky i pro velmi tvarově složité a přesně normované dílce. Hodnota celkové produktivity závisí na obrovském množství zvolených parametrů, což je pro každou společnost výzvou a snaží se tyto parametry dovést k dokonalosti. Proto se společnosti z odvětví strojního průmyslu zabývající se touto problematikou snaží svým zákazníkům nabídnout takový sortiment zboží, který uspokojí všechny jejich požadavky.

Diplomová práce se zabývá problematikou čelního frézování s úhlem $\kappa_r = 45^\circ$, při kterém byly použity šestihranné vyměnitelné břitové destičky od firmy Dormer Pramet s.r.o a osmihranné VBD od dvou konkurenčních společností Sumitomo a Palbit. Na základě těchto zvolených řezných nástrojů bylo cílem porovnat, zda jsou osmihranné destičky ekonomicky výhodnější. Toto rozhodnutí jsme se pokusili stanovit na základě dvou zkoušek. První byla funkční zkouška obrábění z hlediska drsnosti obrobené plochy. Princip spočíval ve volbě řezných parametrů a zkoumání, jaká má jejich případná změna vliv na obráběný materiál. Další byla zkouška trvanlivosti, která zkoumala opotřebení břitu nástroje. V obou těchto zkouškách byly vyměnitelné břitové destičky testovány na dvou různých materiálech. První z nich byla uhlíková ocel s označením C45 (1.1191 / ČSN 12 050) a druhá korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349). Na tyto měření mělo kromě změn řezných podmínek a volby materiálu vliv i řezné prostředí při kterém se frézovalo. Konkrétně bylo prostředí zkoumáno ve dvou stavech, a to v případě, kdy se do místa řezu přiváděla procesní kapalina a v druhém případě se tříska z prostředí odváděla pouze za pomoci stlačeného vzduchu.

Společnost Dormer Pramet s.r.o ve svém sortimentu nabízí mnoho typů VBD určených k čelnímu frézování. My jsme se však rozhodli především z ekonomického pohledu porovnávat takovou destičku, která má k dispozici co největší počet využitelných řezných hran. Taková je právě námi testovaná destička s označením HNGX 0604ANSN-M; M8330, která je šestihranná a současně i oboustranná, tudíž na ní můžeme využít celkem 12 řezných hran. Od konkurentů destičky disponují celkem 16ti řeznými hranami. Vybrané VBD jsou určeny spíše pro hrubovací operace

Tato diplomová práce je součástí výzkumného projektu a praktického experimentu obrábění z pohledu ekonomického frézování. Všechny zkoušky proběhly ve specializovaných zkušebnách pod odborných dohledem ve firmě Dormer Pramet s.r.o.

1 Obecná charakteristika daného problému

V současnosti jsou na nástroje kladeny velmi vysoké požadavky ze všech směrů, především také z ekonomického hlediska, které je velice důležitou součástí strojního průmyslu. Každý potencionální zákazník požaduje kvalitní produkt s dlouhou životností, který je multifunkční ale zároveň je na trhu dostupný za příznivou cenu. Konkurence je v dnešní době velice schopná, a proto musí firmy přicházet na trh s novinkami, které všechny tyto požadavky budou splňovat a na základě kterých si je zákazník zakoupí.

1.1 Společnost Dormer Pramet s.r.o.

V roce 2014 se spojil výrobce monolitních nástrojů Dormer Tools se společností Pramet Tools, která se specializuje na výrobu nástrojů s vyměnitelnými břitovými destičkami (VBD) ze slinutého karbidu.

Spojení těchto dvou značek přináší velice významnou výhodu v doplnění sortimentu na trhu a jeho propojení. Díky tomuto propojení společnost poskytuje svým stávajícím i novým zákazníkům přístup k velmi rozsáhlému spektru velmi kvalitních nástrojů v kombinaci se snadno dostupnými službami, aby bylo dosaženo co největší spokojenosti zákazníků.

Společnost je známá také svými výkonnými nástroji určené pro frézování, jak malých obrobků, tak i větších součástí, na které je potřeba použít opravdu velké nástroje.

Pravidelně jsou na trh uváděny společností nové frézy a vyměnitelné břitové destičky, které jsou vyvinuty tak, aby vyhovovaly požadavkům nejmodernějšího obrábění.

Nástroje ze sortimentu jsou vyvíjeny na základě spolupráce mezi největšími firmami v rozmanitých oblastech třískového obrábění. [1]



Obrázek 1.1 – Aktuální logo společnosti. [1]

1.2 Vyměnitelné břitové destičky a slinuté karbidy

Vyměnitelná břitová destička nebo VBD je součástka nesoucí řezný břit, která je upnuta do tělesa obráběcího nástroje. Většinu těchto destiček je možno otáčet, tudíž je možné využít více břitů, tzn., že není pouze na jedno použití. [4]

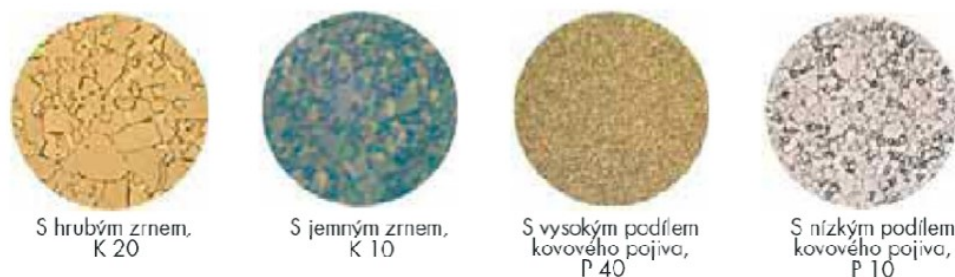
VBD se vyrábějí ze **slinutého karbidu**: Jde o nejvíce používaný materiál pro výrobu VBD. Tento materiál se skládá z tvrdých částic karbidu, které jsou spojené kovovým pojivem. Nejvíce významným a důležitým karbidem, je karbid wolframu (WC), karbid tantalu (TaC), karbid titanu (TiC) a karbid niobu (NbC). Pojivem je v tomto případě z největší části kobalt (Co).



Obrázek 1.2 – Příklady typů VBD. [5]

Podle velikosti zrna se dělí karbidy na dva základní druhy:

- **Jemnozrnné karbidy:** základní prášek je tvořen z jemnozrnných částic. Podíl pojiva je menší než u hrubozrnného karbidu, který ovlivňuje jak chemické, tak i mechanické vlastnosti karbidu. Je vhodný pro dokončovací operace, utváří menší průřezy třísky a má vysokou odolnost vůči opotřebení.
- **Hrubozrnné karbidy:** základní prášek je tvořen hrubozrnnými částicemi. Podíl pojiva je větší než u jemnozrnného karbidu, který dále ovlivňuje chemické a mechanické vlastnosti karbidu. Je houževnatý, vhodný pro hrubování a utváří větší průřezy třísky. [7]

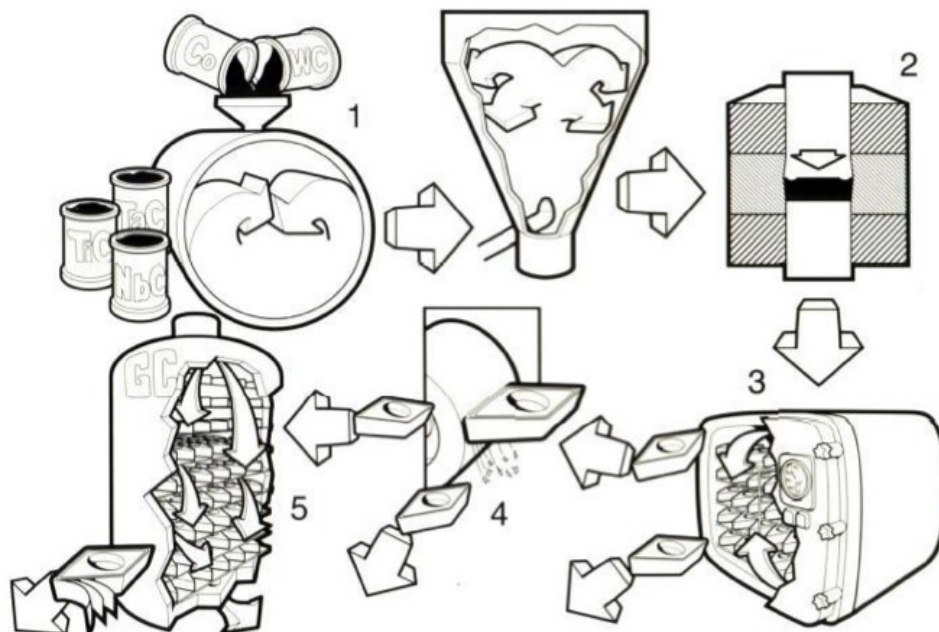


Obrázek 1.3 – Mikrostruktura karbidů. [7]

1.2.1 Proces výroby slinutých karbidů

Výroba slinutého karbidu se skládá z několika následujících operací. Jsou to materiály vyráběné procesem práškové metalurgie. Slinuté karbidy se mezi tvrdými nástrojovými materiály považují za ty nejpevnější a na základě toho, jsou vhodné pro obrábění s vysokými posuvovými rychlostmi a také pro složité přerušované řezy. Hlavním cílem výroby je získat nástroje o vysokém výkonu a s homogenní strukturou. [10]

Jednotlivé etapy průběhu výroby slinutých karbidů jsou vyobrazeny na následujícím obrázku.



Obrázek 1.4 – Průběh výroby SK (1 - výroba směsi prášků, 2 - lisování polotovarů, 3 - slinování, 4 - broušení destiček, 5 - povlakování destiček). [11]

1.2.2 Výroba prášku

Základní surovinou slinutých karbidů jsou prášky kovů, také sloučeniny kovů a v některých případech i nekovů. Jakost výsledných výrobků je závislá na chemických a fyzikálních vlastnostech prášků, také na chemické čistotě a chemickém složení, tvaru a velikosti částic.

Prášky můžeme získat převážně ze všech kovů, a i z jejich sloučenin, je toho možné docílit následujícími dvěma základními způsoby:

Fyzikálně-chemicky: štěpením karbonylů, redukcí oxidů, elektrolytickým vylučováním a chemickým slučováním s nekovy (např. WC, TaC, TiC a další).

Mechanicky: drcením ve vířivých a kulových mlýnech nebo rozprašováním tekutého kovu. [7]

1.2.3 Lisování polotovarů

Kovové prášky a jejich směsi se za pomoci lisování upravují do tvaru výrobků. V průběhu lisování také dochází ke změně vlastností prášků jako je například: zmenšování pórovitosti, může dojít k plastické deformaci částic a styková plocha mezi zrny se zvětšuje. Lisovací tlaky jsou v rozmezí mezi 200 až 690 MPa.

Podmínky lisování jsou ovlivněny následujícími faktory:

- Lisovacím tlakem,

- Způsobem lisování (za studena, za tepla, izostatické lisování, protlačování, vibrační lisování a další),
- Velikostí a tvarem výlisku,
- Přísadami pro usnadnění lisování.

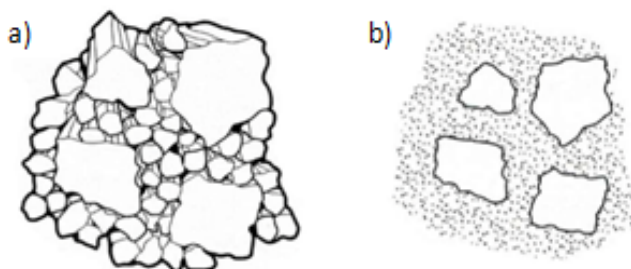
Díky procesu lisování se vytvoří lepší vzájemný kontakt mezi částicemi prášku, což nám umožňuje při zvýšené teplotě perfektní difúzi v celém průřezu polotovaru i uplatnění dalších přechodů. Pevnost výlisku přibližně úměrně stoupá s lisovacím tlakem.

1.2.4 Slinování

Proces slinování nám zajistí dosažení požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností, tažnosti, pevnosti, tvrdosti a elektrické vodivosti.

Teplota slinování je nižší než teplota tavení daného kovu. Pokud se slinuje směs prášků různých kovů, může se stát, že se nízko tavící fáze nataví. Množství roztavené fáze bývá zpravidla malé, tudíž tvar výrobku zůstává zachován, ale jeho rozměr se zmenšuje. Smrštění délkových rozměrů udává přibližně 17 až 25 % za předpokladu, že je pórovitost nulová. To ale i za použití zpracování nejmodernějších metod činí 1 až 2 %.

Je samozřejmé, že i podmínky slinování jsou ovlivněny určitými faktory jako například: teplota, čas, prostředí (vakuum, ochranný plyn) a také druh slinování (přímé, nepřímé apod.) Teplota u slinování bývá většinou 0,8násobek teploty tavení. U některých prášků se teplota pohybuje mezi 1050 až 1150 °C, u mědi 800 až 850 °C. Kovy, u kterých zrna při ohřevu na vyšší teploty nerostou, mají teplotu slinování velice blízkou teplotě tání. Doba slinování činí přibližně něco mezi 2 až 3 hodinami. [7]



Obrázek 1.5 – Princip slinování: a) před slinováním, b) po slinování. [14]

1.2.5 Finální úprava (broušení, povlakování)

Vyměnitelné břitové destičky dosáhnou své konečné podoby:

- **Přímo vylisováním – VBD** jsou vylisovány tak přesně, že u nich byly vytvořeny tvary utvařečů a fazetek,
- **Broušením** – VBD docílí své finální podoby za pomoci technologie broušení.

V současnosti jsou při výrobě VBD kladeny vysoké požadavky na přesnost > finální úprava **leštěním** a odolnost proti opotřebení > **povlakováním**.

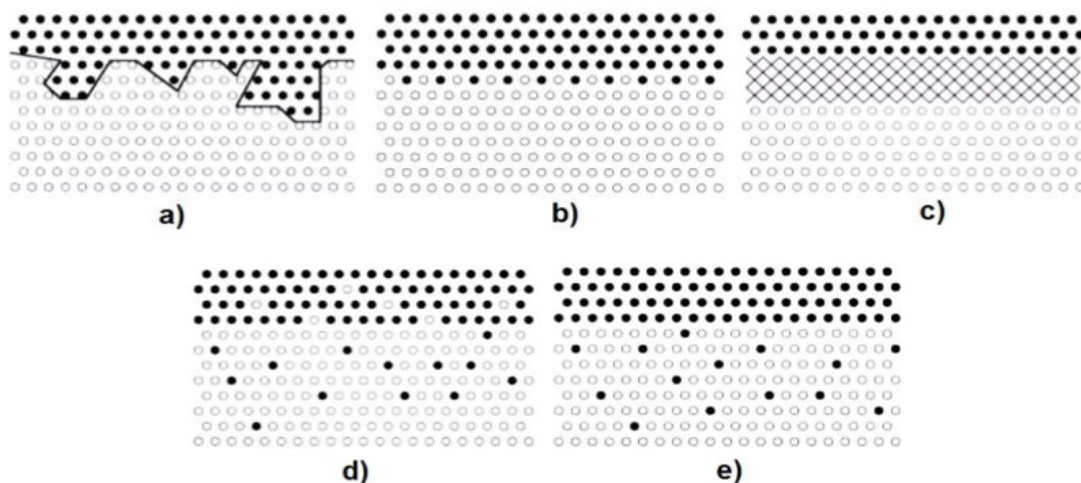
1.2.6 Povlakování

Pro vývoj řezných materiálů je povlakování považováno za velice významný krok. Proces povlakování slinutých karbidů byl zaveden koncem 60. lech 20. století.

Tenký povlak, jehož tloušťka je pouhé 2 μm výrazně pozitivním způsobem změnil výkonnost nástrojů ze slinutých karbidů. Díky odolnosti vůči teple došlo k významnému zvýšení řezné rychlosti a trvanlivosti břitu, také bylo možné dosáhnout větších posuvů. Ve výsledném porovnání slinutých karbidů s povlakováním a bez povlaku, byla jednoznačně trvanlivost u povlakovaných SK mnohonásobně vyšší. Moderní povlakované SK se výrazně obohatily o výkonnost a spolehlivost. [14]

Jednou z velmi důležitých vlastností povlaků je jejich soudržnost s podkladovým slinutým karbidem. Soudržnost podkladu s povlakem závisí na struktuře, chemických, fyzikálních a mechanických vlastnostech podkladového materiálu, tloušťce a typu povlaku a také na podmínkách povlakování. V oblasti rozhraní **podklad – povlak** je možné rozlišit různé charakteristické přechodové oblasti a mezivrstvy:

- **Mechanická přechodová oblast** – povlak, který se nanáší je zachycen v otevřených povrchových pórech, čímž vzniká čistá mechanická vazba (obrázek a).
- **Přechod monovrstva/monovrstva** – přechod mezi povlakem a podkladem je přes jednu nebo několik atomových rovin, přechod se tvoří v případě, že mezi povlakem a podkladem nedojde k vzájemné difuzi (obrázek b).
- **Spojený přechod** – mezi podkladem a povlakem se tvoří jasně ohraničená mezivrstva s definovaným chemickým složením (obrázek c).
- **Difuzní přechod** – mezivrstva se tvoří strukturně gradientním přechodem z podkladu materiálu do povlaku. (obrázek d).
- **Pseudodifuzní přechod** – částice s vysokou energií proniknou do určité hloubky v krystalové mřížce podkladu, kde zůstanou uvězněny, aniž by začal působit difuzní mechanismus (obrázek e). [10]



Obrázek 1.6 – Rozhraní podkladu - povlak. [10]

1.2.7 Tvorba povlaku metodou PVD a CVD

Proces povlakování zjednodušeně spočívá v nanášení tenké vrstvy materiálu, která má vysokou tvrdost a skvělou odolnost proti opotřebí. Tyto pozitivní vlastnosti vyplývají především z toho, že povlakovaný materiál neobsahuje žádné pojivo, má jemnější zrnitost o jeden i více řádů a také má méně strukturních defektů (dutiny, póry) a tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu, který má za následek opotřebení nástroje.

Podle principů dělíme metody povlakování do dvou základních skupin:

- **Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování)**

Proces je charakteristický svými nízkými teplotami, které se pohybují pod 600°C, podle některých zdrojů je rozmezí teplot mezi 150 až 500°C za sníženého tlaku (0,1 – 1 Pa). Původně byla metoda vyvinuta za účelem povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí, v současnosti je používána ve velkém rozsahu u vyměnitelných břitových destiček ze slinutých karbidů, které jsou určeny pro přerušované řezy (frézování). Průběh metody vytváří tlaková zbytková pnutí v povlaku, na vlastnosti podkladu nemá nepříznivý vliv a je schopna povlakovat i ostré hrany. Na druhou stranu je však nutná mnohem důkladnější příprava povrchu před povlakováním (odmašťování, čištění) má také směrový účinek, což znamená že plochy, které jsou odvráceny od místa odpařování povlakovaného kovu, by bez nepřetržitého pohybu vzorku, zůstaly zcela bez povlaku. Další nevýhodou je tenčí vrstva povlaku (kolem 5 μm) a užší možnost výběru typu povlaku. [15]

Proces výroby PVD:

Všechny PVD povlakovací metody se provádějí ve vysokém vakuu. Principem je převádění pevného kovu (například titanu) do stavu plynného. Přidáním reakčního plynu (například dusíku) se poté na povrchu nástrojů, vytvoří tenký, tvrdý a mimořádně přílnavý povlak (například TiN = nitrid titanu). Metody PVD se navzájem liší způsobem, jakým je kov odpařován.

Celý proces PVD metody se dá obecně rozdělit do tří na sebe navazujících kroků:

- I. Převedení deponovaného materiálu do plynné fáze,
- II. Transport par ze zdroje substrátu,
- III. Vytváření vrstvy na povrchu substrátu.

Podle způsobu, jakým kovové ionty získáme, dělíme metody na:

- a) Napařování,
- b) Naprašování,
- c) Iontová implementace.

- **Metoda CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze)**

Probíhá za velmi vysokých teplot pohybujících se nad 1000°C. Až do začátku 90. let byla tato metoda povlakování slinutých karbidů považována za nejčastější. Jedna z výhod je výborná přilnavost (adheze) mezi podkladem a povlakem, nanášení vrstev o větších tloušťkách v rozmezí 10 – 13 μm , je možné povlakovat předměty složitějších tvarů. Povlaky mají všestranný účinek a jsou variabilní. Za nevýhody lze považovat možnost ovlivnění podkladového materiálu (snížení pevnosti v ohybu), nelze povlakovat ostré hrany a je možný vznik zbytkových pnutí v povlaku. [15]

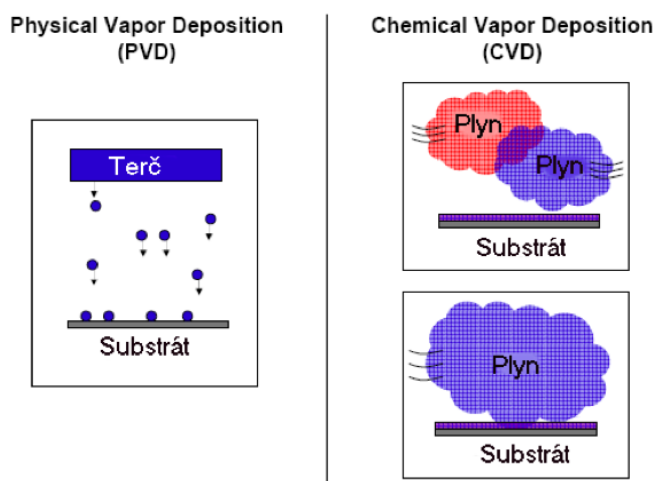
Proces výroby CVD:

Princip tvorby tenkých vrstev na podkladovém materiálu je založen na reakci chemických sloučenin v plynné fázi v přímé blízkosti povrchu substrátu s následným umístěním produktů reakce na povrchu.

Proto, abychom docílili dokonalého přilnutí povlaku se základním materiálem, je nutné precizní očištění povrchu součásti, na které se tvoří povlak. Jako první se provádí mechanické čištění a následně odmašťování v párách terachloru a poté probíhá několikanásobné čištění v ultrazvukových čističkách. Konečné čištění probíhá v reaktivní komoře, kde je povrch součásti bombardován atomy argonu. Z toho tedy vyplývá, že proces probíhá ve dvou fázích. V první řadě jsou obrobky čištěny v reaktivní komoře a následně je na ně nanášen vlastní povlak. Je důležitá také ochrana součástí, na které nemá být povlak nanesen například tím, že se zasune do přípravku. [16]

Rozlišujeme čtyři druhy metody CVD:

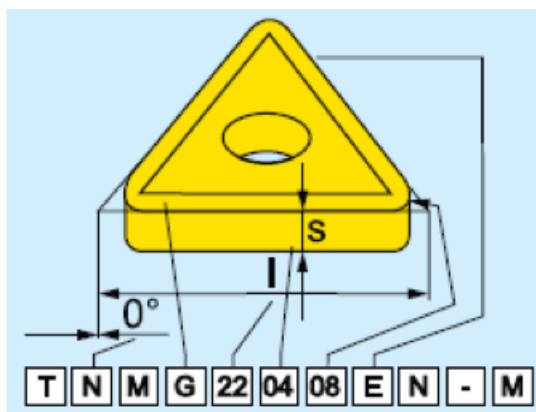
- I. Tepelně indukované.
- II. Plazmaticky aktivované.
- III. Fotonově indukované (např. laser).
- IV. Elektronově indukované (elektronový paprsek).



Obrázek 1.7 – Schéma tvorby povlaků metodou: a) PVD, b) CVD. [18]

1.2.8 Systém značení VBD podle ISO

V současnosti je na trhu celá řada firem a společností, kde každá nabízí široký sortiment produktů. Vzhledem k tomu, aby nedocházelo ke nepřesnostem a chybám ve značení, byl zaveden normalizovaný systém značení podle ISO (International Organization for Standardization). Jedná se o skupinu písmen a číslic, z nichž má každá svůj daný význam, který je dán normou.



Obrázek 1.8 – Obecné ISO značení pro VBD. [8]

1.3 Charakteristika obráběných materiálů

Za pomoci vybraných nástrojů bylo v praktické části této práce prováděno frézování na dvou různých materiálech, a to na **a) nástrojové oceli** (spadá do skupiny označení **P**) a za **b) korozivzdorné oceli** (spadá do skupiny označení **M**). Takové označení skupin rozdělujeme v souladu s normou ČSN ISO 513 celkem do šesti základních skupin. V každé skupině jsou sdruženy takové materiály, které vyvolávají jakostně stejný typ namáhání břitu a tím pádem vyvolávají i podobný typ opotřebení.

P	uhlíkové (nelegované) oceli třídy 10, 11, 12 legované oceli tříd 13, 14, 15, 16 nástrojové oceli uhlíkové (191..., 192..., 193...) nástrojové legované oceli (193... až 198...) uhlíková ocelolitina skupiny 26 (4226...) nízko a středně legované ocelolity skupiny 27 (4227...) feritické a martenzitické korozivzdorné oceli (třídy 17..., lité 4229...)
M	austenitické a feriticko austenitické oceli korozivzdorné, žáruvzdorné a žárovevné oceli nemagnetické a oťeruvzdorné

Obrázek 1.9 – Rozdělení obráběných materiálů dle normy ISO 513. [12]

Obecná charakteristika uvedených dvou skupin:

Skupina P – do této skupiny jsou zařazeny tvz. dvoj-karbidové slinuté karbidy typu WC-TiC-Co. Je to skupina označena modrou barvou a je určena pro skupinu obráběných materiálů, které tvoří dlouhou třísku jedná se například o uhlíkové oceli, uhlíkové oceli apod.). Obsah TiC je přínosný tím, že zajišťuje vysokou odolnost vůči difúzi za vysokých teplot, která je jednou z nežádoucích příčin vzniku výmolu na čele nástroje.

Skupina M – tuto skupinu tvoří více-karbidové slinuté karbidy typu WC-TiC-TaC.NbC-Co. Skupiny je označena žlutou barvou a je určena pro obrábění takových materiálů, které tvoří dlouhou a střední třísku (např. austenitické korozivzdorné oceli, tvárné litiny, lité oceli apod.). [12]

1.3.1 Nástrojová ocel neboli NO

Jedná se o nejstarší druh materiálu, který byl kdy používán pro výrobu řezných nástrojů, ale i přes tento fakt stále nacházejí své uplatnění ve výrobě. Jejich výhodou je velice dobrá houževnatost i pořizovací cena. Nelegované nástrojové oceli nejčastěji obsahují 0,4 až 1,1 % uhlíku (C) a nízký obsah Manganu (Mn). Tento druh materiálu je vhodný pro výrobu nástrojů určených pro strojní obrábění řeznou rychlostí 15 m.min⁻¹, pracujících za maximální teploty do 220°C a jsou vhodné i pro výrobu ručních nástrojů.

Naopak do legovaných ocelí se pro zlepšení jejich vlastností přidávají tzv. legující neboli přísadové prvky. Legující prvky můžeme rozlišit na prvky **karbidotvorné** (Cr, V, W, Mo), které do vysokých teplot vytváří tvrdé a stálé karbidy a na prvky **nekarbidotvorné** (Ni, Co, Si), kde břit nástroje vyrobený z nástrojové oceli dokáže odolávat vysokým teplotám 250°C až 350°C.

Neobvyklou skupinou legovaných nástrojových ocelí jsou rychlořezné oceli, tento typ materiálu obsahuje karbidotvorné prvky **Cr, W, V, Mo** a nekarbidotvorný prvek **Co**. Obsah uhlíku se nejčastěji pohybuje v rozsahu do 1 %. Podle obsahu legujících prvků jsou rychlořezné oceli vhodné k výrobě řezných nástrojů určených o obrábění ocelí a ocelí na odlitky o vysoké tvrdosti a pevnosti těžkoobrobitelných materiálů. Břit nástroje je schopný odolávat teplotám až 700 °C při řezných rychlostech 25 až 50 m.min⁻¹. [13]

1.3.2 Korozivzdorná ocel

Jedná se o druh materiálu, který má při normálních i vyšších teplotách zvýšenou odolnost vůči korozi. U těchto materiálů dochází také ke korozi, ale za podstatně delší dobu, díky tomu roste jejich životnost a také cena. První dochované patenty označující ocel jako korozivzdornou pocházejí z Anglie z roku 1872. Tato ocel obsahovala 30% chromu a 2% wolframu. V českých zemích vznikly první patenty na korozivzdornou ocel v roce 1910, kdy kladenská huť Poldi představila ocel Anticoro, použitou na výrobu hlavně loveckých pušek. Aktuálně je výroba korozivzdorných ocelí plně rozšířena a její sortiment je velice pestrý.

Korozivzdorné oceli a jejich slitiny můžeme rozdělit do tří základních skupin:

- Dle chemického složení,
- Dle nutnosti tepelného zpracování,
- Dle struktury materiálu.

Významným faktorem ovlivňující rozdělení jednotlivých druhů korozivzdorných ocelí je zastoupení legujících prvků. [13]

Vliv legujících prvků na odolnost proti korozi

Koroze se u jednotlivých druhů materiálů, za stejných podmínek okolního prostředí projevuje různými způsoby. Může se lišit korozním napadením nebo také rychlostí jakou materiál koroduje. Díky kombinaci různých legujících prvků můžeme korozi předejít úplně nebo alespoň z části omezit její šíření na minimum. Jedná se o takové prvky, jež jsou schopny **pasivace = vytvoření ochranné vrstvy na povrchu součásti**. Ta zabrání vzniku elektrochemické koroze v oxidačním prostředí.

U legovaných i nelegovaných ocelí se vždy vyskytují nečistoty, které nejsme schopni běžnými technologickými postupy zcela eliminovat. Normy tento nepříznivý fakt berou v úvahu, ale pouze v povolené míře, jako příklad je možno uvést síru v oceli. Dalším typem nečistot mohou být ty, které se dostaly do materiálu během jeho používání nebo již v procesu jeho výroby. Jde například o tzv. okuje, které byly během výroby zaválcovány do materiálu. Tyto příměsky negativně ovlivňují odolnost vůči korozi a bývají právě iniciátory nechtěné koroze. [13]

1.4 Rovinné frézy

Sortiment rovinných fréz, které tato společnost nabízí nástroje pro frézování rovinných ploch konkrétně typů ($\kappa_r = 45^\circ$ až 75°). Konkrétně typ rovinného frézování $\kappa_r = 45^\circ$ je ten, kterým se ve své práci budu zabývat. V nabídce je možno nalézt různé varianty pro produktivní i všeobecné frézování. Sortiment je také doplněn o nabídku fréz pro těžké hrubovací frézování ($\kappa_r = 57^\circ$ až 60°). V nabídce jsou dostupné i rovinné frézy od průměru 20 mm do průměru až 315 mm podle velikosti a typu VBD. Právě v této oblasti je možné využít i frézy kopírovací a frézy do rohu (zejména frézy určené pro vysoké posuvy).



Obrázek 1.10 – Rovinná fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami. [1]

2 Technologie frézování

Frézování je operace třískového obrábění, při které dochází za pomoci vícezubého rotačního nástroje neboli frézy k úběru materiálu daného obrobku ve formě třísek. [3]

2.1 Řezný proces a tvorba třísky

2.1.1 Řezný proces

Při procesu frézování je hlavní pohyb rotační a koná ho vždy nástroj. Vedlejší pohyb koná obrobek. Ve většině případů se jedná o pohyb přímočarý, jehož pohyb je umožněn ve třech osách.

Moderní technologie frézování umožňují obrábět tvarově složité součásti za pomoci vedlejších pohybů ve více osách současně s vysokou produktivitou práce.

Obráběcí proces je přerušovaný a každý břit frézy při něm odřezává třísky o rozdílné tloušťce. Na rozdíl od soustružení, břit frézovacího nástroje pracuje na principu přerušovaného řezu, tzn., že během jedné otáčky nástroje každý břit vnikne minimálně jednou do obrobku a jednou ze záběru. Každý břit tedy během jedné otáčky odřízne minimálně jednu třísku. [20]

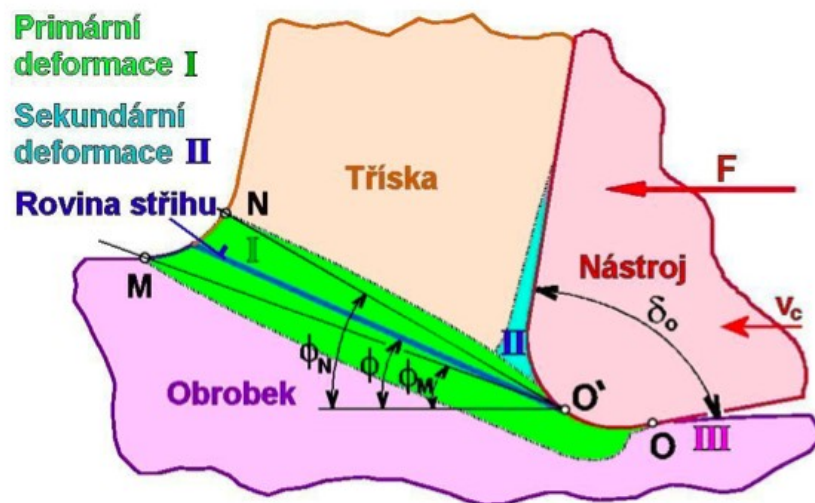
2.1.2 Plastická deformace

Plastická deformace nastává tehdy, když řezný nástroj vniká do obráběného materiálu pod určitou silou F , tím dojde ke vzniku napětí nad i pod břitem nástroje a následně ke vzniku pružné i plastické deformace. V momentě, kdy dojde k překročení meze plastické deformace dochází k oddělení třísky. Plastickou deformaci v místě řezu, je velice obtížné sledovat, jelikož ji ovlivňuje několik prvků jako je například: chemické složení, obráběný materiál, mechanické a fyzikální vlastnosti a struktura. Plastickou deformaci můžeme rozdělit do třech tříd:

Primární plastická deformace I – V této oblasti se materiál zpevňuje, při vyčerpání plasticity dochází ke kluzu materiálu. Tvar a velikost primární plastické oblasti ovlivňují fyzikální vlastnosti materiálu, jako například zpevňovací a deformační schopnosti obráběného materiálu, úhel čela, řezu a řezná rychlost. Následně dochází ke vzniku jednotlivých prvků třísek.

Sekundární plastická deformace II – V průběhu oddělování materiálu vzniká mezi čelem nástroje a obrobkem síla, která vytváří deformaci obráběného materiálu na spodní straně třísky. Tato deformace způsobuje adhezni opotřebení nástroje. Na nástroji poté dochází k nežádoucímu vytvoření nárůstku.

Terciální plastická deformace III – tato oblast je stanovena intenzitou a hloubkou deformace. [18]



Obrázek 2.1 – Členění plastické deformace. [18]

Plastická deformace způsobuje v procesu řezání následující:

- **Oddělení třísky od obrobku** – Oblast I,
- **Mechanické zatížení nástroje řeznými odpory** (největší vliv má oblast I, střední oblast II, nejmenší oblast III),
- **Tepelné zatížení nástroje** – největší vliv má oblast I, menší oblast II, nejmenší oblast III,
- **Opotřebení nástroje** – na čele v důsledku vlivu oblasti II, na hlavním hřbetě v důsledku vlivu oblasti III,
- **Změnu textury materiálu ve tříске** – vliv oblasti I, v povrchové vrstvě obrobku vliv oblasti III a částečně i oblasti I,
- **Vznik zbytkových napětí v povrchové vrstvě obrobku** – oblast III, částečně i oblast I
- **Pěchování třísky** – v oblasti I a II, průřez a délka třísky neodpovídají teoretickým hodnotám.

2.1.3 Tvorba třísky

Způsob, jakým se tříška utváří souvisí s geometrií řezné hrany. Vhodná řezná hrana i geometrie utvařiče třísek s jistotou zajišťuje dlouhou životnost nástroje, nízké řezné síly, správné utváření třísek a jejich odvádění, a tím i bezpečný a stabilní proces.

Díky správnému utváření třísky se zamezuje poškození obrobku, nástroje a v neposlední řadě i poranění obsluhy stroje, předchází problémům s odvodem třísek a prostojům ve výrobě. Nejlepší volbou tedy je, aby se třísky tvořily krátké ale ne příliš dlouhé, jelikož to může způsobit snížení životnosti nástroje. Při tvorbě příliš krátkých třísek hrozí možnost vzniku mikrotrhlin na řezné hraně, což následně vede k předčasnému vylomení hrany. Po zvážení těchto faktů vyplývá, že nejvhodnějším typem třísky je krátký tvar spirály. [19]

Ovlivňujících faktorů při tvorbě třísek je několik. Nejhlavnějším je samotný materiál obrobku. Lze jej zařadit do čtyř skupin:

- Materiály s extrémně dlouhou třískou (neželezné kovy).
- Materiály s dlouhou třískou (oceli).
- Materiály s krátkou třískou (kalené materiály a litiny).
- Materiály tvořící třísky nepravidelného tvaru (vysoce legované slitiny, nerezové oceli).

Důležitými vlastnostmi materiálů jsou *pevnost v tahu* a *tvrdost* (čím větší je tvrdost, tím jsou třísky kratší). Další vlastností, která má vliv na utváření třísek je *tažnost* – vyšší tažnost způsobí utváření delších třísek. Tyto rozdílné vlastnosti můžeme pozorovat zejména mezi ocelí a nerezovou ocelí. Nerezová neboli korozivzdorná ocel má vyšší tažnost než ocel a tím pádem se při obrábění tohoto materiálu utváří třísky delší. Důležitým ovlivňujícím faktorem při obrábění je i struktura materiálu obrobku. Při obrábění austenitických nerezových ocelí (austenitická struktura) se utvářejí třísky, které mají nepravidelný tvar, proto vzniká u takových materiálů problém s kontrolou tvorby třísek.

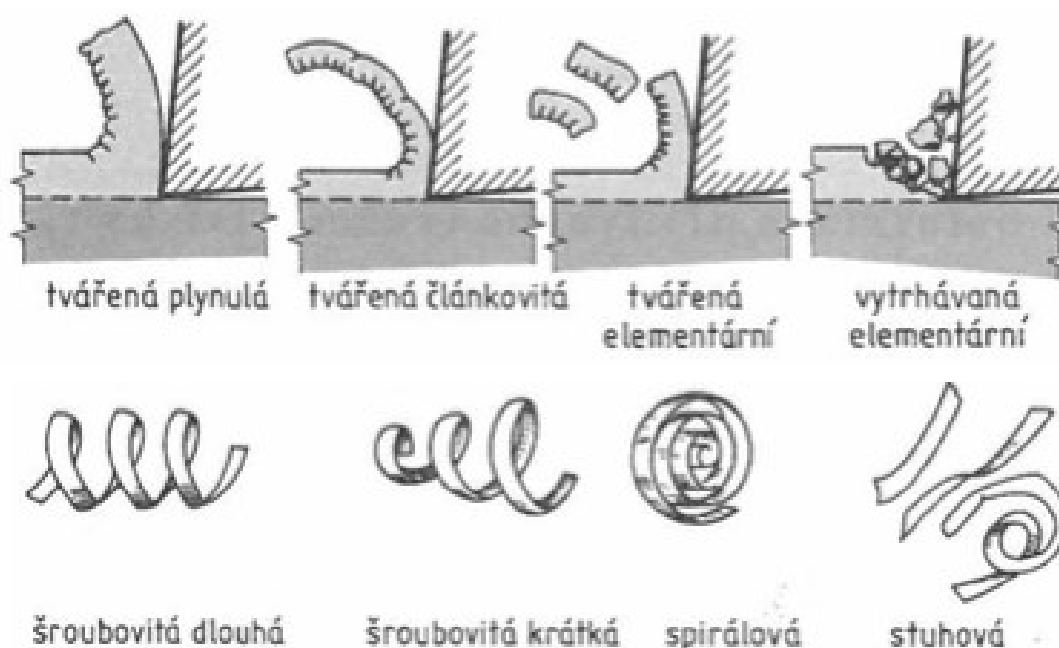
Dalším prvkem, který s jistotou ovlivňuje tvorbu třísek je samotný řezný nástroj. Pokud jsou úhly čela nástroje větší dojde ke snížení řezné síly, mají však tendenci k utváření příliš dlouhých třísek. Dalším faktorem způsobujícím tvorbu dlouhých třísek je menší úhel řezné hrany nástroje. Za předpokladu, že použité řezné podmínky jsou zvoleny správně jsou rozhodujícími faktory pro kontrolu tvorby třísek především řezná hrana nástroje a geometrie utvařeče třísek. [19]

Tvary třísek

Lze je považovat jako vedlejší odpadní produkt při procesu obrábění. O průběhu procesu vypovídá právě jejich tvar. Na snazší odvod třísek ze stroje má tvarování a lámání třísek opodstatněný dopad. Třísky by měly zabírat co nejmenší objem ve stroji. Jejich tvar má také značný vliv na opotřebení a životnost řezného nástroje a také na kvalitu výsledného povrchu obrobku. Vždy se snažíme docílit jednoduchého tvaru třísky. Pro dosažení nejlepšího tvaru můžeme využít celou řadu faktorů. Některé jsou dané, ale dalšími můžeme proces obrábění pozitivně ovlivnit a tím zajistit správné utváření třísky.

Faktory ovlivňující vznik jednotlivých druhů třísek mohou být:

- Řezné podmínky,
- řezné prostředí,
- geometrie břitu,
- druh řezného nástroje,
- druh obráběného materiálu.



Obrázek 2.2 – Druhy a tvary třísek. [18]

Vliv chlazení na proces utváření třísky

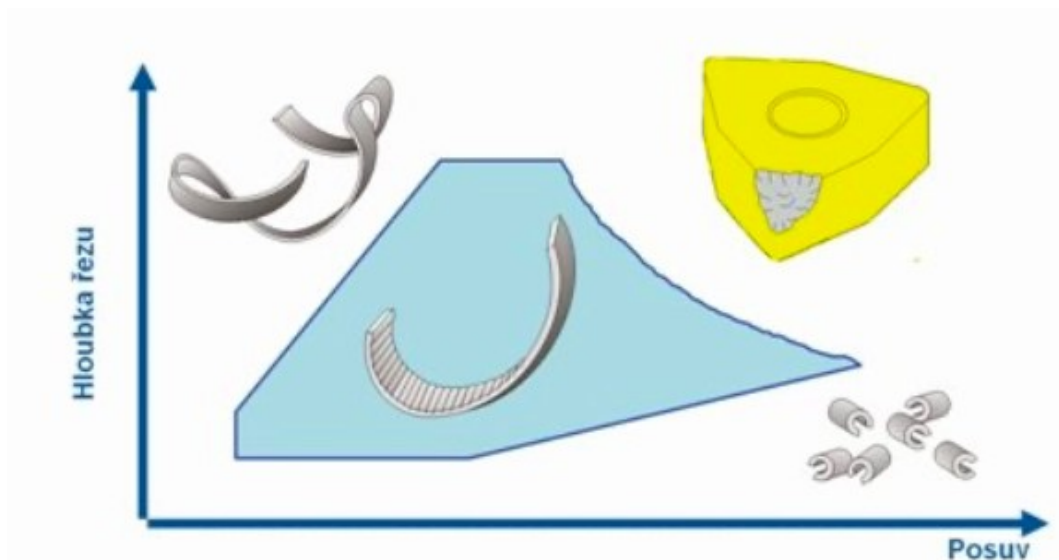
Vliv procesu chlazení na výsledný tvar třísky je diskutabilní. Tradiční způsoby jako například obrábění za sucha nebo chlazení emulzí, MQL chlazení (systém za použití minimálního množství mazání), nemají na proces utváření třísky zásadní vliv. Avšak pokud uvažíme použití systému přímého vysokotlakého chlazení – Seco Jetstream Toolong (HPDC), pak právě tento proces ovlivní nejen tvorbu třísek ale i životnost nástroje a kvalitu obrobku. [19]

Použité řezné podmínky pro utváření třísek

Nejpodstatnějším řezným parametrem pro kontrolu tvorby třísek je **posuv**. Obecně platí, že čím jsou posuvy větší, tím kratší budou třísky. Zajímavou řeznou podmínkou, která vznikla kombinací právě posuvu a hloubky řezu – je tzv. štíhlostní poměr třísky. Tento poměr je definován jako hloubka řezu děleno posuvem. Teoreticky by měl být tento poměr co nejblíže k hodnotě 10 (tzn. že hloubka řezu je 10x větší než posuv). Je možný vznik odchylky od této hodnoty a souvisí především s materiálem obrobku. Co se týče vlivu řezné rychlosti na proces utváření třísky, není tak snadné ho definovat. Pokud jsou nízké posuvy, budou se utvářet tím delší třísky, čím vyšší bude použita řezná rychlost.

Kombinace hloubky řezu a posuvu

Na výše uvedeném schématu utváření třísky je graficky zobrazen výše zmiňovaný vztah mezi materiálem obrobku, řeznou hranou a geometrií utvařeče, řeznými podmínkami a tvorbou třísky. Pro určitý typ řezné hrany, schéma znázorňuje, jaké kombinace posuvu a hloubky řezu vedou ke správné tvorbě třísky [19].



Obrázek 2.3 – Schéma utváření třísky. [12]

2.2 Řezné síly při čelním frézování

Při stanovení řezných sil při frézování se vychází ze silových poměrů na jednom břitu, který je v poloze určené úhlem φ_i .

Síla působící na i-tý zub je následně dána vztahem:

$$F_{ci} = A_{di} \cdot k_{ci}$$

Měrná řezná síla je dána vztahem:

$$k_{ci} = \frac{F_{ci}}{A_{di}}$$

Celková řezná síla, která působí na frézu je stanovena vztahem, kde Z_z je počet zubů v záběru.

$$F_c = \sum_{i=1}^{Z_z} A_{di} \cdot k_{ci}$$

Z výše uvedené silové analýzy vyplývá možný vznik cyklického zatížení frézovacích hlav, které mohou způsobit nežádoucí důsledky na průběh opotřebení břitu a vznik chvění.

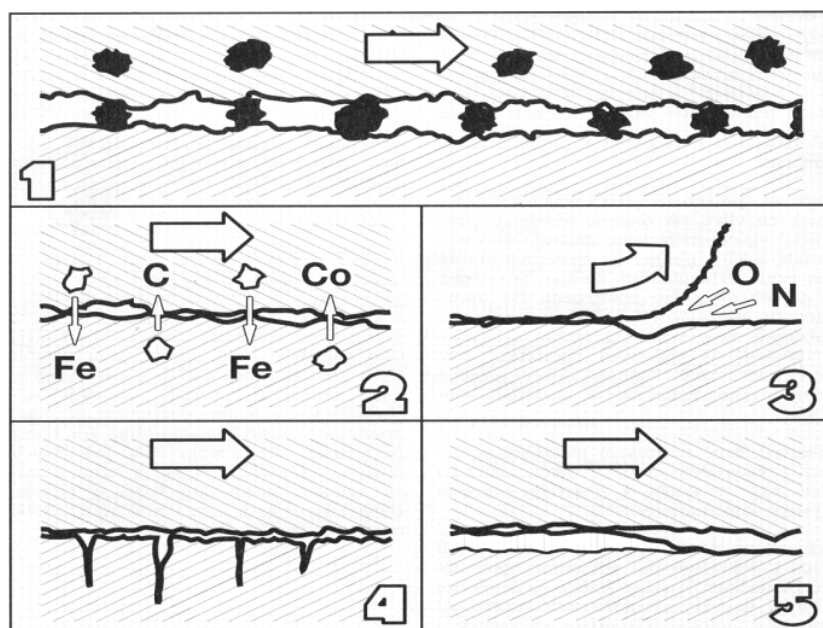
V průběhu frézování, se síla dále mění v závislosti na stavu opotřebení frézy. Tato skutečnost je nejvíce znatelná u nástrojů s břity ve šroubovici, kdy na samotném začátku frézování je fréza v důsledku pozitivních úhlů čela vtahována do řezu, a na konci frézování, kdy je již plně opotřebovaná, se od obrobeneho povrchu razantně odtlačuje. Měřením časových závislostí rozvoje sil při procesu frézování pomocí dynamometrů lze nepřímo kvantifikovat i průběh opotřebení. [21]

2.3 Opotřebení řezného nástroje

2.3.1 Mechanismy opotřebení

Vlivem působení zatěžujících faktorů, které mohou při procesu obrábění působit na břit nástroje, vznikají některé z následujících mechanismů opotřebení:

- 1) Abrazivní opotřebení.
- 2) Difúzní opotřebení.
- 3) Oxidační opotřebení.
- 4) Lom (statický nebo dynamický).
- 5) Adhezní opotřebení. [20]



Obrázek 2.4 – Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástroje. [20]

Abrazivní opotřebení – jedná se o velmi rozšířený typ opotřebení, vzniká především působením tvrdých částic v materiálu obrobku. Lze říci, že je to podobné jako při broušení, kde se tvrdé částice dostávají mezi povrch obrobku a nástroje. Vlivem mechanického zatížení vzniká rovinná plocha na hřbetě břitu.

Schopnost břitu odolávat abrazivnímu opotřebení je převážně závislá na jeho tvrdosti. Řezný nástrojový materiál, který obsahuje strukturu tvrdých částic, bude mít dobrou odolnost vůči opotřebení, může se však stát, že jiným druhům zatížení nebude při procesu obrábění odolávat tak snadno. [21]

Difúzní opotřebení – Je způsobeno chemickými vlivy při procesu obrábění. Právě chemické vlastnosti a afinita řezného nástroje vůči materiálu obrobku, jsou rozhodujícími činiteli pro vznik a průběh difúzního opotřebení. Tvrdost řezného materiálu má na tomto procesu jen minimální podíl. O podílu difúzního opotřebení rozhoduje materiál obrobku a chemické složení řezného nástrojového materiálu. Některé nástrojové materiály nereagují s obrobkem vůbec, avšak jiné mohou mít s materiálem obrobku vysokou afinitu.

Při vzniku afinity mezi ocelí a slinutým karbidem dochází k pokračujícímu difuznímu opotřebení. Nežádoucím důsledkem je vznik žlábků na čele bříty. Jelikož tento typ opotřebení úzce souvisí s teplotou, tak při vysokých řezných rychlostech dochází k vytvoření největšího žlábků. [21]

Oxidační opotřebení – Souvisí s vysokými teplotami při řezném procesu, které v kombinaci s okolním vzduchem mají za následek oxidaci u většiny kovů, takové oxidy však mohou působit velmi rozdílně. Porézní filmy oxidu tvoří kobalt a wolfram, ty jsou snadno odváděny s třískou. Jiné oxidy, jako například oxid hlinitý jsou podstatně pevnější a tvrdší. Je tedy zřejmé, že jsou opět některé materiály náchylnější k oxidaci více a některé méně. Především v místě kontaktu bříty s obrobkem, kde končí šířka třísky vznikají typické žlábků.

Lom – má často termomechanické příčiny. Kvůli teplotním výkyvům a zatížení řeznými silami může docházet k vydrolování a lomu řezného nástroje. Na tato zatížení reagují řezné nástrojové materiály různě. Čistá mechanická únava může být vyvolána s ohledem na mechanickou pevnost bříty příliš vysokými řeznými silami. Příčinou může být například příliš velká tvrdost nebo pevnost materiálu obrobku, vysoké posuvy, nebo naopak příliš tvrdý materiál řezného nástroje. Vlivem vysokých teplot může dojít kvůli plastické deformaci bříty ke změknutí řezného nástroje a tím i k deformaci bříty a změně jeho geometrie, to má za následek zvýšené řezné síly a následný lom. [21]

Adhezní opotřebení – Vzniká jak u ocelí, které tvoří dlouhou třísku, tak i u materiálů tvořících krátkou třísku jako je například hliník nebo šedá litina. Tento typ opotřebení se vyskytuje převážně při nízkých teplotách. Opět dochází ke vzniku nárůstku mezi břítem a třískou. Jedná se o průběh, v němž dochází k nárůstu vrstev, které jsou z třísky vytvrzovány a navařovány a stávají se tak součástí bříty nástroje. V momentě, kdy se teploty řezání zvýší, zmenší se předpoklad pro vznik tohoto jevu, což znamená, že ke vzniku adhezního opotřebení a tvorbě nárůstku dojde v závislosti na afinitě mezi řezným nástrojovým materiálem a materiálem obrobku. Dalším faktorem jsou v určité oblasti i tlaky v místě řezu. [21]

2.3.2 Klasifikace druhů opotřebení bříty nástroje

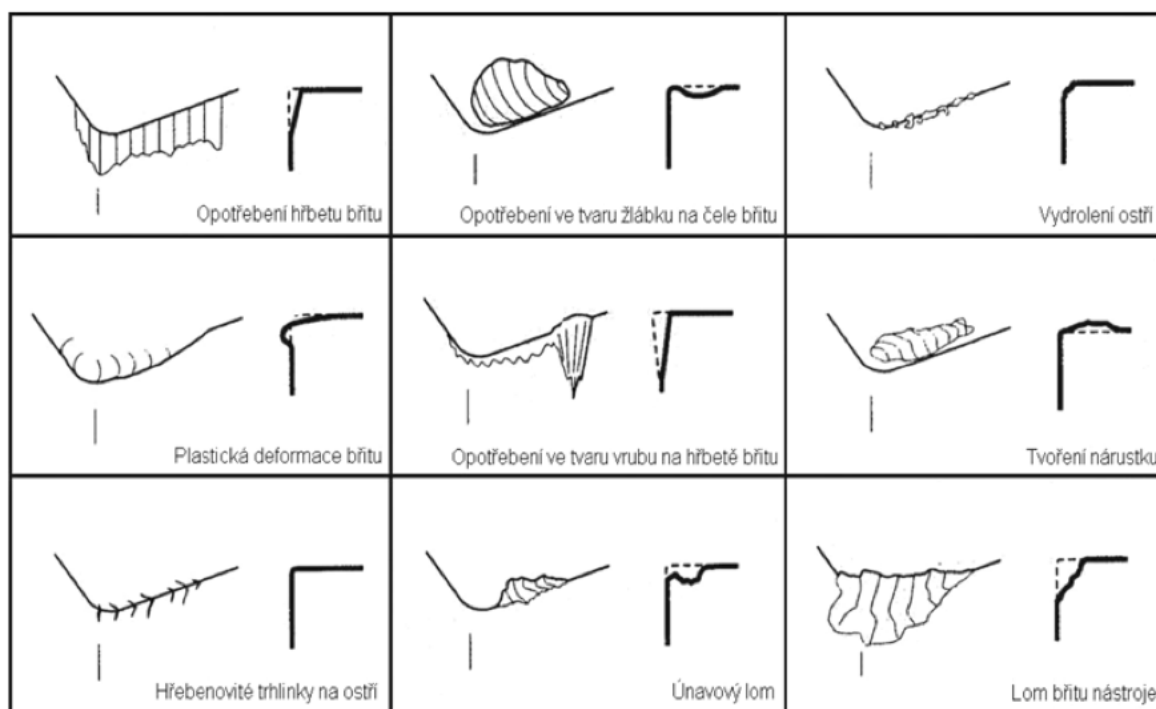
Klasifikace byla provedena za účelem vytvoření báze pro posouzení obráběcích operací a tím i možností ovlivnění produktivity. Následující kritéria obrábění jsou důležité pro správné určení vhodného řezného nástrojového materiálu a také pro určení odpovídajících parametrů obrábění. Jedná se především o:

- Přesnost rozměrů,
- jakost obrobené plochy,
- kontrolovaný odchod třísky.

Při zvětšeném pohledu na břit nástroje po obrábění a následné posouzení jeho stavu, umožní kontrolovat vhodnost trvanlivosti, její spolehlivost a v neposlední řadě i možnost jejího prodloužení. Pro každý proces existuje optimální průběh opotřebení.

Pro vznik optimálního průběhu opotřebení je za potřebí vhodně zvolit odpovídající řezné podmínky, správný nástroj, důležitá je dobrá jakost materiálu obrobku a dobré podmínky pro obrábění, rozhodovat se na základě vlastních zkušeností, případně se obrátit na kvalifikovanou odbornou pomoc.

V závislosti na technologických podmínkách řezného procesu se klasifikují následující typy opotřebení břitu nástroje. [22]:



Obrázek 2.5 – Klasifikace druhů opotřebení. [22]

Zde jsou uvedeny nejdůležitější formy opotřebení. Všechny případy nelze považovat za formu pravého opotřebení. Jsou však příčinou způsobující nežádoucí rychlý lom destičky, a proto se musí zcela eliminovat. Vyvážené opotřebení nástroje zajistí optimální trvanlivost, při které je možné bezpečně, spolehlivě a s opakovatelnou přesností využívat břit nástroje.

2.4 Metody frézování

2.4.1 Rovinné frézování

Frézování patří mezi velmi rozšířené metody obrábění. Obrovskou výhodou u frézování je poměrně velká výkonnost při velmi dobré kvalitě obrábění. Frézování nachází své využití pro obrábění hranolovitých (prizmatických) rovinných, rotačních a tvarových ploch, dále také pro obrábění drážek různých druhů profilů a také na výrobu ozubení a závitů.

Při frézování dochází k úběru materiálu za pomoci břitu rotujícího nástroje – tzv. **frézou**. Při tomto procesu je hlavní pohyb rotační a vykonává ho nástroj. Vedlejším

pohybem je posuv, který je ve většině případů přímočarý a vykonává jej obrobek. V dnešní době u moderních strojů jsou posuvy plynule měnitelné a dají se realizovat ve více směrech současně, jedná se o tzv. Víceosá obrábění centra. Řezný proces není kontinuální nýbrž přerušovaný, jelikož každý zub odřezává krátké třísky o různé tloušťce. [10]

Z technologického hlediska se podle polohy osy nástroje vzhledem k ploše, která je obráběna rozlišuje frézování na:

Čelní – čelem nástroje – osa nástroje je kolmá na obráběnou plochu, hloubka řezu se nastavuje ve směru osy nástroje (obrázek 2.6).

Válcové – obvodem nástroje – osa nástroje je rovnoběžná s obráběnou plochou

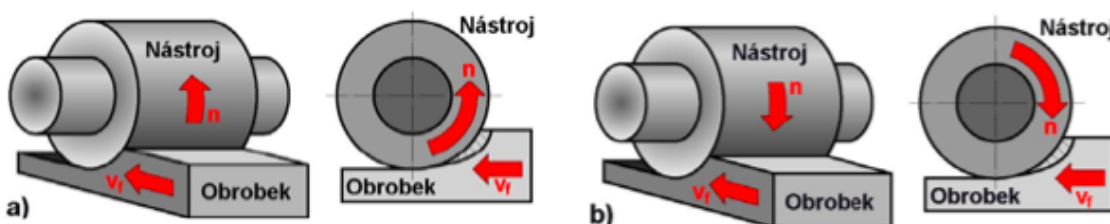
Při válcovém frézování se využívají tvarové a válcové frézy. Zuby se nacházejí pouze po obvodu nástroje, v rovině, která je kolmá na osu frézy se nastavuje hloubka řezu a směr posuvu. Výsledná obrobena plocha je rovnoběžná s osou otáčení nástroje. [10]

V závislosti na smyslu otáčení nástroje dělíme válcové frézování na:

- Nesousledné (obrázek 2.7 a))
- Sousledné (obrázek 2.7 b))



Obrázek 2.6 – Čelní frézování. [10]



Obrázek 2.7 – Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné. [10]

2.5 Čelní frézování

Čelní frézování zahrnuje následující operace:

- Běžné rovinné frézování.
- Frézování s vysokými rychlostmi posuvu.
- Dokončování s použitím hladících břitových destiček.
- Čelní frézování v náročných podmínkách. [9]

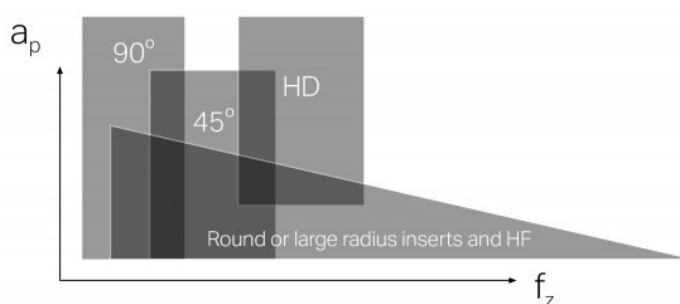
2.5.1 Běžné rovinné frézování

Čelní frézování je nejrozsáhlejší frézovací operací, kterou je možno provádět s využitím velkého množství různých nástrojů. Nejčastěji jsou využívány právě frézy s úhlem nastavení 45° , je ale možné za určitých podmínek použít frézy s kruhovými břitovými destičkami, frézy pro frézování do rohu nebo také kotoučové frézy. Je nutno se ujistit, zda je dobře zvolena vhodná fréza pro danou operaci, která umožní dosažení optimální produktivity. [9]

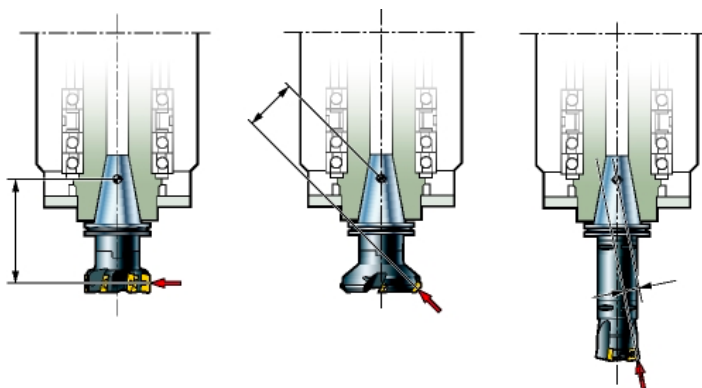
2.5.2 Volba nástrojů

Přehled fréz pro čelní frézování

Obrázek uveden níže zobrazuje hlavní oblasti použití jednotlivých frézovacích koncepcí v závislosti na hloubce řezu a_p , a posuvu na zub f_z . [9]



Obrázek 2.8 – Hlavní oblasti použití frézovacích koncepcí. [9]



Obrázek 2.9 – Směr řezných sil při různém úhlu nastavení. [9]

Čelní frézy s úhlem nastavení $10^\circ \div 65^\circ$ a ponorné frézy

Tento rozsáhlý sortiment fréz je určen především pro čelní frézovací operace, ale můžeme do této skupiny zařadit také frézy, které mají úhel nastavení velmi malý, právě tyto jsou určené pro ponorné frézování.

Frézy s úhlem nastavení 45°

- První volba pro všeobecné použití.
- Snížení sklonů k vibracím při dlouhém vyložení nástroje nebo nedostatečně tuhém upnutí.
- Efekt ztenčení třísky umožňuje zvýšení produktivity.

Frézy s úhlem nastavení 90°

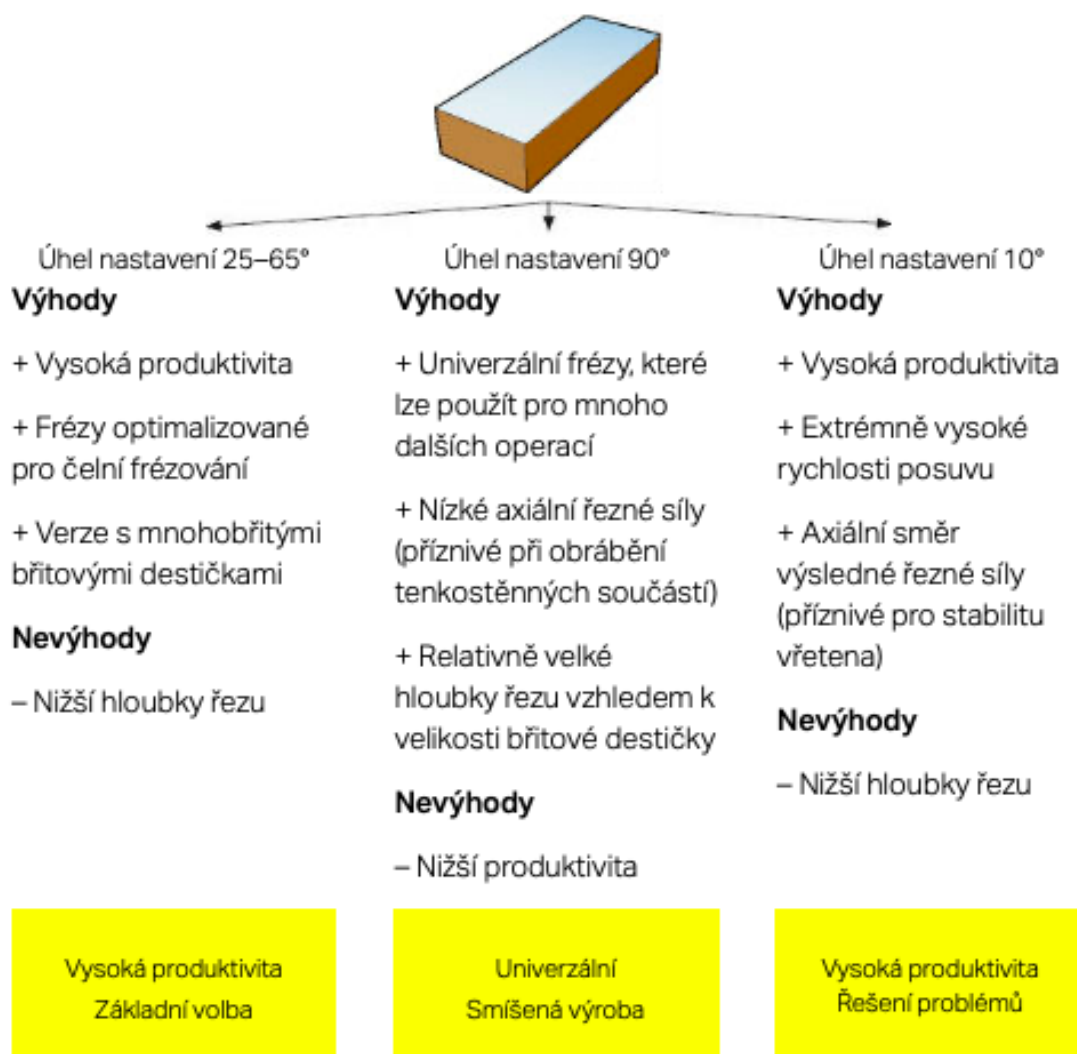
- Tam, kde je požadován tvar 90°.
- Tenkostěnné součásti.
- Slabě upnuté součásti.

Frézy s kruhovými břitovými destičkami nebo s velkým poloměrem zaoblení rohů

Frézy s kruhovými VBD jsou velmi univerzální, mají vynikající předpoklady pro postupné zahlubování a používají se jak pro velmi náročné aplikace při čelním frézování, tak i pro tvarově složité součásti při obrábění.

- Frézy pro všeobecné použití.
- Nejvyšší pevnost a odolnost břitů.
- Obzvláště vhodné pro obrábění žárovzdorných slitin ISO S.
- Mají klidný a plynulý záběr.
- Velký počet řezných hran na břitovou destičku. [22]

Volba metody pro čelní frézování (příklad):



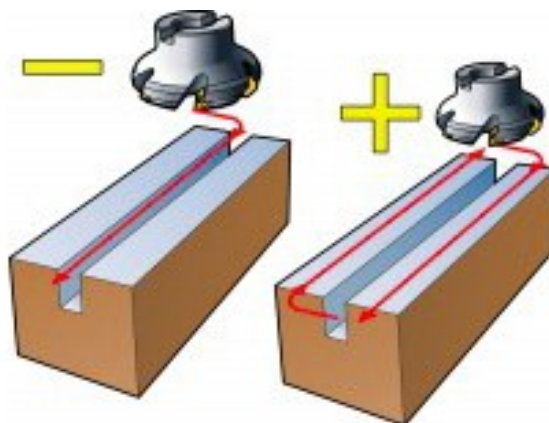
Obrázek 2.10 – Použití jednotlivých úhlů nastavení. [22]

2.6 Doporučené postupy u jednotlivých metod čelního frézování

2.6.1 Čelní frézování nesouvislých ploch s přerušovaným řezem

V tomto případě je lepší se tomuto typu frézování vyhnout.

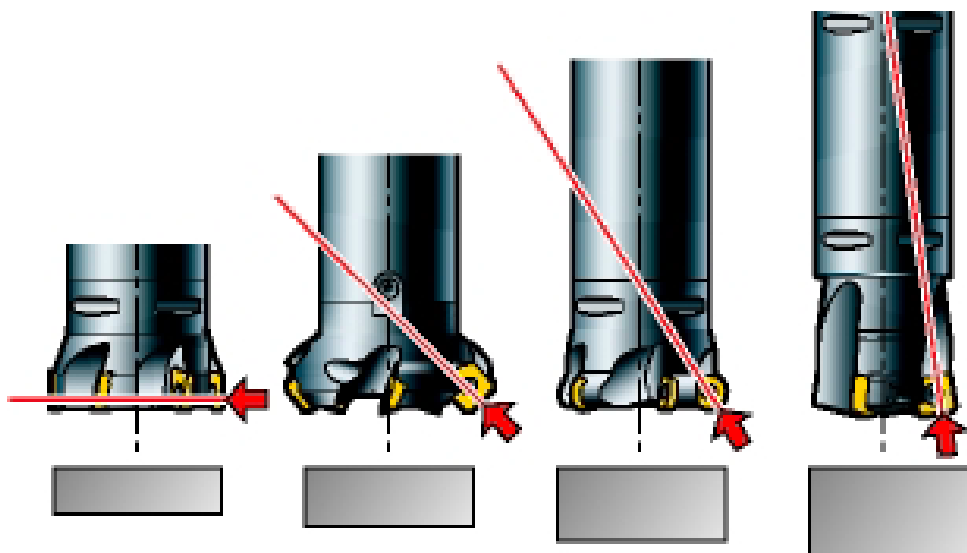
- Pokud je možnost vyhnout se frézování přes místa porušující celistvost obráběné plochy (drážky, díry), tak takto učiňme. Je to z toho důvodu, že přerušované řezy jsou pro břity nástroje velice náročné, jelikož se značně zvyšuje počet vstupů do řezu a výstupy z řezu probíhají nežádoucím způsobem.
- Jedna z možností, jak udržet malou tloušťku třísky na výstupu z řezu, je snížit v místech s porušením celistvosti obráběné plochy doporučenou rychlost posuvu o 50 %.



Obrázek 2.11 – Frézování přes místa porušující celistvost. [22]

2.6.2 Čelní frézování tenkostěnných poddajných partií

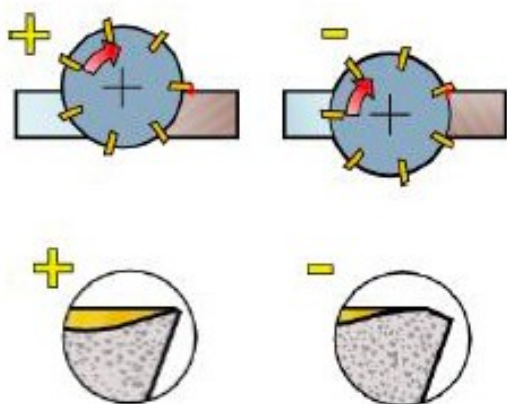
- Je nutno provést analýzu řezných sil s ohledem na stabilitu upínacího přípravku i obrobku.
- Pro frézování součástí, které mají omezenou tuhost v axiálním směru je nejlepší možnost použít rohovou frézu s úhlem 90°, u které je hlavní část řezných sil orientována v radiálním směru.
- Jedna z alternativ je použití čelní frézy s lehkým řezem.
- Z důvodu omezení velikosti řezných axiálních sil na minimum je nutno se vyvarovat použití axiální hloubky řezu menší než 0,5 – 2 mm.
- za použití frézy s hrubou zubovou roztečí, je dosažení snížení počtu zubů v záběru na minimum.
- z důvodu snížení velikosti řezných sil na co nejnižší hodnotu je důležité použít ostré, pozitivní geometrie břitu (-L).
- jako prostředek k řešení problémů využijeme frézu s nerovnoměrnou zubovou roztečí.



Obrázek 2.12 – Frézování tenkostěnných a poddajných partií. [22]

2.6.3 Frézování obrysů tenkostěnných partií pomocí čelních fréz

- Při frézování obrysů tenkostěnných partií pomocí čelního frézování je za potřeby umístit frézu mimo střed obráběné plochy. Díky tomu je průběh záběru plynulejší a řezné síly jsou orientovány více souběžně s obráběnou stěnou, což také napomáhá ke snížení vzniku vibrací.
- Pro tyto operace je vhodné zvolit takové zubové rozteče frézy, které nám dále zajistí, že za všech okolností bude v záběru více než jen jeden břit.
- Je vhodné použít geometrii břitových destiček s co nejlehčím řezem (pro lehké obrábění místo pro střední, pro střední místo pro těžké).
- S ohledem na snížení rizika vzniku vibrací, je vhodné použít pro obrábění tenkostěnných součástí menší poloměry rohu VBD a kratší délky paralelního břitu.
- Nastavit nízké hodnoty řezných podmínek, malé hloubky řezu a_p , a nízké hodnoty posuvu na zub f_z .

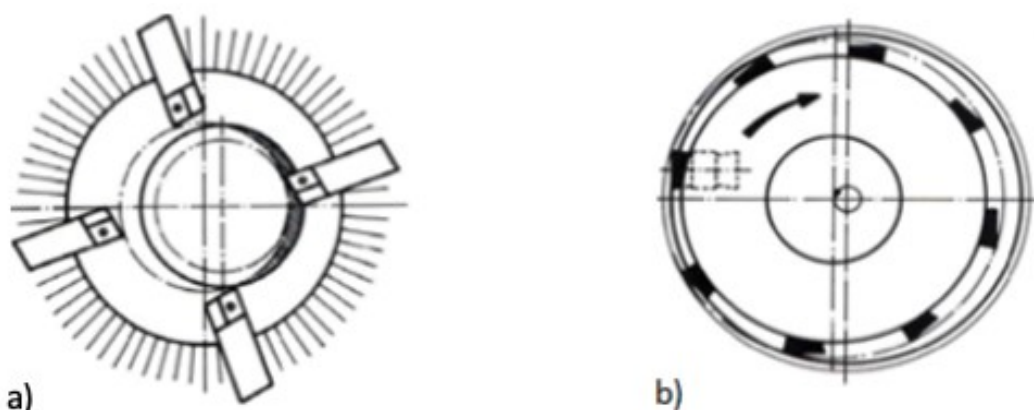


Obrázek 2.13 - Frézování obrysů tenkostěnných partií za pomoci čelní frézy. [9]

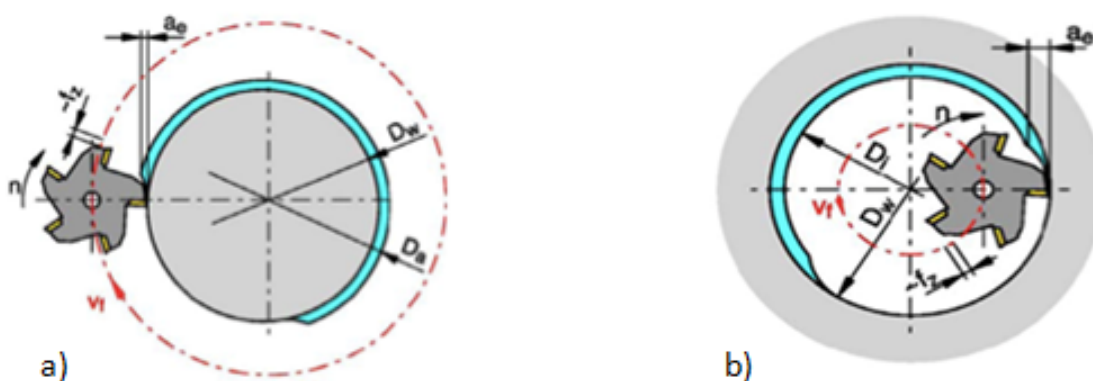
Existují také další způsoby frézování, které jsou odvozeny od výše uvedených základních způsobů:

Okružní – obvodem rotačního nástroje, na obrobku, který má také rotační tvar – osy nástroje i obrobku jsou obvykle vzájemně skloněné a hloubka řezu se nastavuje ve směru kolmém na osu obrobku. Okružním frézováním lze obrábět jak vnější, tak i vnitřní válcové plochy.

Planetové – je určeno pro obrábění vnitřních i vnějších válcových ploch. [10]



Obrázek 2.14 – Okružní frézování: a) vnější, b) vnitřní. [10]



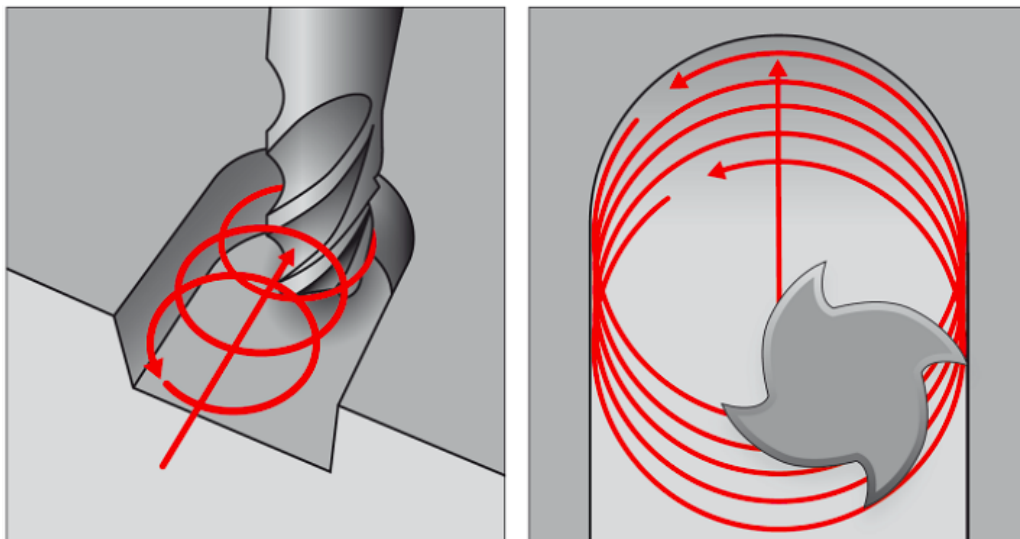
Obrázek 2.15 – Planetové frézování: a) vnější, b) vnitřní. [10]

3 Nové metody výkonového frézování

3.1 Trochoidní frézování

Princip metody spočívá ve frézování po kruhové interpolaci se současným posuvem vpřed v radiálním směru (spirálovitá dráha) při vysokých hodnotách axiální hloubky řezu (a_p až $2,5 \times D$) a nízkých hodnotách radiální hloubky (a_e) nepřesahující hodnotu 10 % průměru nástroje. K programování ne nutně počít program CAM systém, který podporuje tuto strategii. Je to univerzální strategie, která je vhodná na hrubovací a polodokončovací operace obrábění hlubokých drážek, kapes, dofrézování rohu po předchozí operaci a obecných ploch.

U frézování drážek je nutné zachovat poměr šířky drážky k průměru nástroje menší než 70 % a radiální hloubku řezu do 5 % průměru nástroje. Z toho tedy vyplývá, že v případě obrábění drážky o šířce 20 mm lze použít frézu o maximálním průměru 14 mm a maximální radiální hloubkou řezu 0,7 mm. [23]



Obrázek 3.1 – Schéma trochoidního frézování po kruhové interpolaci se současným posuvem vpřed v radiálním směru (spirálová dráha). [23]

Strategie trochoidního frézování je v poměru s tradičními metodami frézování drážek a jiných ploch bezpečnější a dosahuje vyšší životnosti nástroje a také jeho produktivity. Další klad je snížení nákladů na nástroje, a to z toho důvodu, že tato strategie umožňuje použití nástrojů o menším průměru. Strategie je vhodná pro všechny typy CNC frézovacích center. [23]

3.1.1 Výhody trochoidního frézování

Výhody tohoto typu frézování jsou znatelné především při obrábění velkého množství dílců nebo při frézování hlubokých drážek nebo vysokých boků. Mezi výhody tedy patří:

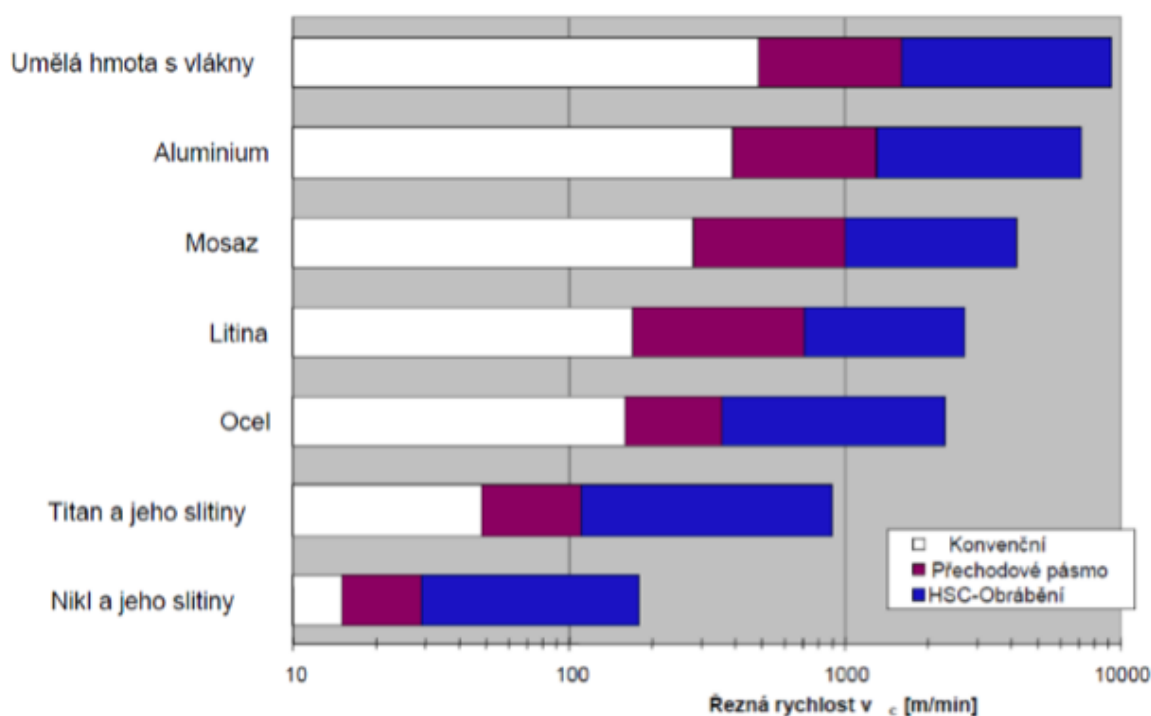
- Nezanedbatelná úspora času.
- Procesní spolehlivost.
- Delší životnost.
- Nižší opotřebení nástrojů.
- Menší zatížení stroje.
- Vyšší otěruodolnost [24].

Uvedené výhody vyplívají ze skutečnosti, že se při trochoidním frézování udržuje minimální úhel záběru, a to redukuje chvění nástroje. Na vyšší otěruodolnosti má zásluhu zvětšená oblast, ve které se fréza může opět ochlazovat. [24]

3.2 Vysokorychlostní frézování

Jedná se o metodu zastoupenou obecnou zkratkou HSC (high speed cutting), nebo HSM (high speed milling = vysokorychlostní frézování). Jde o inovační metodu zefektivnění výroby za dodržení určitých předpokladů. Oproti konvenčnímu obrábění zde dochází ke změně jednoho či více parametrů. Také jejich dráha je často odlišná od klasického obrábění.

Bývají zde kladeny výrazně vyšší požadavky na stroj i nástroj. Při volbě stroje je nutné počítat například s tím, že by vřeteno mělo zvládat vyšší otáčky, než je obvyklé u klasických strojů (obrázek 3.2). [26]



Obrázek 3.2 – Porovnání HSC obrábění vůči konvenčnímu obrábění. [25]

3.2.1 HSC

Tato zkratka je obecně známá pod názvem vysokorychlostní obrábění. Metoda se oproti konvenční metodě obrábění liší především v řádově vyšších řezných rychlostech. Od metody se tedy očekává, že při zvýšení řezné rychlosti a posuvů, při menším nebo stejném objemu třísek, lze dosáhnout vyššího výkonu obrábění.

Dle volby technologie nebo materiálů, může být řezná rychlost zvětšena až o desetinásobek své hodnoty. Vlivem vyšších rychlostí vzniká samozřejmě i více tepla, to je však odváděno spolu s třískou, jelikož při vysokorychlostním obrábění nestihne tříska předat teplo do nástroje. Z toho plyne menší tepelné zatížení nástroje a celková životnost se zvyšuje. Další výhodou HSC metody je obvykle nižší řezná rychlost. Při vhodném nastavení parametrů může být tato síla konstantní, což také prodlužuje životnost nástroje na maximum. Lze jimi obrábět i tenkostěnné součásti. Obrobený povrch dosahuje lepší kvality. Můžeme také obrábět bez chlazení. Toť jen část výhod, které nám tato metoda přináší. Krom výhod má však tato metoda i několik nevýhod. Především se jedná o vysokou pořizovací cenu stroje a s tím jsou spojeny i vyšší náklady na nástrojové vybavení. Vysoké otáčky způsobují vibrace a je nutno nástroj dostatečně vyvažovat. [26]

Základními předpoklady pro metodu HSC jsou:

- Tuhost vřetene,
- Tuhost polohovacího zařízení,
- Velký rozsah otáček,
- Použití vhodných nástrojů,
- Až 10x vyšší posuvové rychlosti.

4 Vlastní návrh řešení daného problému

V rozboru praktické části byly porovnávány vyměnitelné břitové destičky od firmy **Dormer Pramet** s konkurenčními firmami **Sumitomo** a **Palbit**. Za firmu Dormer Pramet se jednalo o šestihrannou destičku s označením **HN 06**. U firmy Sumitomo se jednalo o osmihrannou destičku **ON 05** a osmihranná destička od firmy Palbit nesla označení také **ON 05**. Označení těchto destiček je zde uvedeno obecně bez celého typového označení (celé označení je uvedeno v tabulkách níže). Cílem bylo porovnat dva důležité aspekty v závislosti měnících se hodnot řezných parametrů u procesu čelního frézování. Prvním byla funkční zkouška a dále zkouška trvanlivosti nástroje. Byl kladen důraz i na to, aby jak destičky, tak i frézovací hlava byly od stejného výrobce. Tudíž jsme k měření měli k dispozici 3 frézovací hlavy osazené destičkami, z nichž každá reprezentovala jednotlivou firmu (viz tabulka 4.2). Proces frézování a samozřejmě i konečnou drsnost povrchu a trvanlivost nástroje ovlivňovalo několik různých aspektů. Na základě výsledného vyhodnocení, které je blíže rozebráno v následující kapitole, je porovnání VBD od všech tří firem z ekonomického hlediska, což je také hlavním tématem této práce.

Tabulka 4.1 – Změřená geometrie fréz jednotlivých firem.

Výrobce:		Dormer Pramet	Sumitomo	Palbit
Obchodní označení		ECON HN	DGC	PLUS 90845
Axiální hloubka řezu		$a_p = 3,0 \text{ mm}$	$a_p = 3,0 \text{ mm}$	$a_p = 3,5 \text{ mm}$
Označení nástroje - frézy		63A06R-S45HN06C-C	DGFC 13063 RS	063A90845-06-06-022040
Název parametru	Jednotka	Naměřené hodnoty		
Řezný průměr D	[mm]	62,926	66,660	62,000
Upínací otvor d		22,013	22,017	22,014
Celková výška frézy (s VBD) H		40,011	38,420	40,030
Radiální házení RRO		0,013	0,011	0,016
Axiální házení ARO		0,011	0,009	0,011
Úhel nastavení VBD	[°]	$44,85^\circ \div 44,92^\circ$	$44,06^\circ \div 44,26^\circ$	$44,02^\circ \div 44,10^\circ$
Tvrdost tělesa	[HRC]	41	43	44
Použitá VBD	ISO 513	HNGX 0604ANSN-F; M6330	ONEU 05T6ANER-L; ACM 300	ONHX 050505 ANEN-LP; PH7930

Tabulka 4.2 – Označení použitých fréz a VBD jednotlivých firem.

Výrobce	Označení frézy	Úhel nastavení	Geometrie Axiální/radiální úhel lůžka	Typ VBD pro materiál C45	Typ VBD pro materiál X2CrNiMo17-12-2
DORMER PRAMET	63A06R-S45HN06C-C	45°	-7° / -7°	HNGX 0604 ANSN-M; M8330	HNGX 0604ANSN-F; M6330
SUMITOMO CARBIDE - CBN - DIAMOND	DGCF 13063 RS	45°	-5° / -14°	ONMU 05T6ANER-G; ACP200	ONEU 05T6ANER-L; ACM 300
palbit HARDMETAL TOOLS SOLUTIONS	063A90845-06-06-022040	45°	-7° / -7°	ONKX 050505 ANSN-MP; PH 7920	ONHX 050505 ANEN-LP; PH7930

4.1 Dormer Pramet v porovnání s konkurencí

4.1.1 Dormer Pramet

Společnost vznikla v roce 2014. Jejich nový komplexní sortiment nabízí celou řadu nástrojů pro všeobecné strojírenství jako jsou monolitní nástroje a nástroje s vyměnitelnými VBD pro soustružení, vrtání, frézování a závitování. Své služby poskytují více než 30ti pobočkám, které dále celosvětově pokrývají přes sto různých trhů. Ty jsou dále podporovány moderními výrobními závody v Evropě a Jižní Americe a globálními distribučními sítěmi tvořenými třemi strategicky umístěnými distribučními centry.



Obrázek 4.1 – Frézovací hlava a destičky od firmy Dormer Pramet.

4.1.2 Sumitomo

Tato společnost byla založena již v roce 1919. V Japonsku disponuje 26 pobočkami a 124 pobočkami v dalších 69 zemích společnost zaměstnává více než 39 000 zaměstnanců.

Jedná se o Japonského výrobce nástrojů pro obrábění kovů, jehož chloubou jsou břity a nástroje ze slinutého karbidu, CBN a syntetického diamantu určené pro soustružení, frézování a vrtání. Firma používá slinutý karbid své vlastní výroby. [29]



Obrázek 4.2 – Frézovací hlava a destičky od firmy Sumitomo.

4.1.3 Palbit

Společnost Palbit byla založena v roce 1916. Symbolizují výrobu vysoce výkonných nástrojů. Jedná se o značku globálního dodavatele nástrojů pro výrobu karbidu wolframu. Výrobky jsou uznávány jako technologicky vyspělé, které zahrnují roky znalostí o vysoce komplexní metalurgii a vědě o materiálech v práškových karbidech wolframu, vysokorychlostních ocelích, keramice, diamantu a dalších materiálech, které jsou zvláště odolné vůči teple, tlaku a opotřebení.

Denně se společnost snaží vytvářet ty nejkvalitnější nástroje s širokou nabídkou pro jejich klienty. Se třemi obchodními oblastmi (Cutting tools, Wear Parts a Rocky Tools) jsou schopni vytvořit standardní a také na míru šitá řešení, přímo na konkrétní požadavek zákazníka. [30]



Obrázek 4.3 – Frézovací hlava a destičky od firmy Palbit.

4.2 Volba obráběcího stroje

Obrábění probíhalo na specializované zkušebně ve firmě Dormer Pramet za přítomnosti kvalifikovaných pracovníků. Testy se realizovaly na frézovacím centru od české firmy Kovosvit MAS konkrétního typu **MCV 1270 Power**. Stroj umožňuje vysoce kvalitní obrábění díky aplikaci vysokorychlostních vřeten a vysokých posuvů. Disponuje snadným přístupem do pracovního prostoru díky posuvným krytům, které odkrývají jeden roh pracovního prostoru. Vysoká tuhost nosného rámu stroje umožňuje jak silové obrábění, tak i velmi přesné obrábění složitých součástí.

Dynamika lineárních os umožňuje vysokorychlostní obrábění forem.



Obrázek 4.4 – Obráběcí stroj MCV 1270 Power od firmy Kovosvit MAS.

Tabulka 4.3 – Technické parametry obráběcího stroje.

Parametry	Jednotky	Hodnoty
Pojezd v osách X/Y/Z	[mm]	1270/610/720
Max. plocha stolu		1500 x 670
Max. zatížení stolu	[kg]	1200
Max. otáčky vřetene	[min ⁻¹]	8000
Pracovní posuv X/Y/Z	[mm · min ⁻¹]	1 ÷ 40000
Rychloposuv X/Y/Z	[m · min ⁻¹]	40

5 Diskuze experimentů

Experimentální část byla rozdělena do dvou hlavních částí, ve které probíhaly následující obráběcí zkoušky. První část experimentu se zabývala funkční zkouškou tzn., jak velký vliv může mít volba řezných parametrů na výslednou drsnost obráběného povrchu. Druhá část se zabývá trvanlivostí břitu nástroje.

5.1 Volba obráběného materiálu

Pro obráběcí zkoušky byly použity dva různé materiály. V prvním případě se jednalo o uhlíkovou ocel, konkrétně s označením C45 (1.1191 / ČSN 12 050), která spadá do skupiny materiálů s označením **P**. Na zkušebnách se tento materiál používal ve dvou „stavech“, pro funkční zkoušky obrábění byl použit materiál **12 050.1** a pro zkoušky trvanlivosti břitu **12 050.9**. Doplnková číslice charakterizuje ocel v užších tolerancích, což od dodavatele materiálu požadujeme. Tyto konkrétní údaje jsou uvedeny níže v (tab. 5.1).

Rozměry polotovaru uhlíkové oceli ČSN 12 050.1 byly pro funkční zkoušky obrábění 200x300x180 mm. Uhlíková ocel s označením ČSN 12 050.9 měla rozměry 300 x 100 x 790 mm.

Dalším druhem obráběného materiálu byla korozivzdorná ocel, konkrétní značení X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349), tato ocel patří do skupiny materiálů s označením **M**. Rozměry polotovaru korozivzdorné oceli ČSN 17 349 byly pro funkční zkoušky obrábění 100x300x300 mm.

Tabulka 5.1 – Vysvětlení doplňkové číslice materiálu.

Doplňková číslice – <i>x</i>	<i>Stav oceli, daný tepelným zpracováním</i>			
Uhlíková ocel 12 050.x				
.1	Normalizačně žíhaný			
.9	Stav, který nelze označit první doplňkovou číslicí 0 až 8 (zpracovaný dle zvláštního ujednání) Tolerance chemického složení uhlíkové oceli 12 050 s doplňkovou číslicí 9			
	C [%] 0,45 ÷ 0,5	Nb [%] 0,01 ÷ 0,04	Ti [%] 0 ÷ 0,01	Mn [%] 0,6 ÷ 0,75
Korozivzdorná ocel 17 349.x				
.4	Kalený, nebo kalený a popouštěný při nízkých teplotách, nebo při rozpouštěcím žíhání (jen u austenitických ocelí)			

5.1.1 Uhlíková ocel C45 (1.1191 / ČSN 12 050)

Vhodnost použití tohoto druhu materiálu je například pro hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů a dalších. Na větší ozubená kola, ozubené věnce, šneky, rotory šroubových kompresorů, ojnice, pístnice, plunžry, vřetena, písty kompresorů, čepy, šrouby,

dopravní válečky, lamely spojek, kladičky, lůžka, páky, zarážky, kolíky, spojovací součásti, posunovací vidlice, držáky, unašeče satelitů, vahadla, západky, kované svorníky tlakových nádob, vrtací tyče a frézovací trny. Svařitelnost obtížná.

Tabulka 5.2 – Chemické složení oceli C45 (ČSN 12 050.1).

Chemické složení [%]							
C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Cr	Ni	Mo
0,50	0,80	0,40	0,045	208	0,40	0,40	0,10

Tabulka 5.3 – Mechanické vlastnosti uhlíkové oceli C45 (ČSN 12 050.1) – normalizačně žíhaný.

Mechanické vlastnosti	Jednotky	Provedení
		Normalizačně žíhaný
Pevnost v tahu R_m	[Mpa]	min. 540
Mez kluzu R_e		min. 325
Tažnost A5	[%]	min 17
Modul pružnosti v tahu	[GPa]	211
Modul pružnosti ve smyku	[GPa]	79

Tabulka 5.4 – Chemické složení oceli C45 (ČSN 12 050.9).

Chemické složení (%)							
C	Mn max	Si max	P max	S max	Cr max	Ni max	Cu max
0,42 ÷ 0,50	0,80	0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30

5.1.2 Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349)

Austenitická chromniklmolybdenová ocel. V chemickém prostředí se vyznačuje vysokou odolností vůči korozi. Při dlouhodobém vystavení teplotám do 350 °C je odolná vůči mezikrystalické korozi. Obrobitelnost i svařitelnost je u tohoto typu velmi dobrá. Nalezne uplatnění v chemickém, papírenském nebo textilním průmyslu.

Tabulka 5.5 – Chemické složení oceli X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349).

Chemické složení (%)							
C max	Mn max	Si max	P max	S max	Cr	Ni	Mo
0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	16,5 ÷ 18,5	11,0 ÷ 14,0	2,00

Tabulka 5.6 – Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349).

Mechanické vlastnosti	Jednotky	Provedení
		Tepelně nezpracované
Pevnost v tahu R_m	[MPa]	440 ÷ 690
Mez kluzu R_e		176
Tažnost A5	[%]	35
Minimální nárazová práce KV	[J]	68

5.2 Potřebné kontroly před začátkem zkoušky

Před samotným procesem frézování, bylo potřeba učinit několik zkoušek a kontrol. V první řadě bylo nutné správně osadit frézy vyměnitelnými břitovými destičkami, následně proběhla zkouška tvrdosti na všech vybraných materiálech a jako poslední proběhla kontrola házivosti jak v axiálním, tak i v radiálním směru.

5.2.1 Osazení fréz VBD

Do frézovacích hlav byly po obvodu upnuty příslušné vyměnitelné břitové destičky (celkem 6 na jednu hlavu) typem ISO S šroubkem s kuželovou hlavou. Jednotlivé frézovací hlavy byly připevněny k nástrčným upínačům šestihranným válcovým šroubem s vnitřním šestihranem. Všechny upínače mají stopku ve tvaru kuželu ISO A50 stejně jako vřeteno stroje pro upnutí nástrčným typem. Upínače i frézovací hlavy disponují vnitřními kanálky pro efektivní chlazení procesní kapalinou.



Obrázek 5.1 – Osazení jednotlivých fréz.

5.2.2 Měření tvrdosti obráběného materiálu

Měření tvrdosti probíhalo před začátkem obráběcího procesu za pomoci přístroje Proceq Equotip HW.C1. Měření se uskutečnilo jak na materiálu **C45** tak i na materiálu **X2CrNiMo17-12-2** proběhlo pomocí umístění dotykové sondy na pěti různých místech povrchu materiálu. Z těchto míst měření byl přístroj schopený ihned uvést naměřené hodnoty, které se zobrazily na displeji měřícího zařízení. Výsledné hodnoty měření jsou uvedené v tabulce níže a jako příklad je uvedena i fotografie s výsledným grafem a naměřenými hodnotami.

Tabulka 5.7 – Měření tvrdosti jednotlivých materiálů.

Materiál C45		X2CrNiMo17-12-2	
Všechny jednotky v [HB]			
Měření č.1	198,3	Měření č.1	147,3
Měření č.2	154,2	Měření č.2	146,9
Měření č.3	123,1	Měření č.3	143,2
Měření č.4	147,2	Měření č.4	164,2
Měření č.5	152	Měření č.5	176,9
minimum	123,1	minimum	143,3
maximum	198,3	maximum	176,9
průměr	155,5	průměr	155,7



Obrázek 5.2 – Měření drsnosti povrchu přístrojem Proceq Equotip HW.C1.



Obrázek 5.3 – Tabulka přístroje Proceq s naměřenou tvrdostí materiálu C45.

5.2.3 Axiální kontrola házivosti nástroje

Před začátkem samotného frézování, bylo nutné kromě měření tvrdosti materiálu, provést také axiální kontrolu házivosti u každé upnuté destičky (celkem 6 VBD na jednu frézu).

Tato kontrola byla provedena za pomoci přístroje Zoller smarTcheck 450, který je díky své manuální výklopné násvitné kameře, určený pro měření axiálních a radiálních geometrií nástrojů a také pro měření a seřizování nástrojů. Kamera s 50násobným zvětšením dokáže provádět dokonale inspekci nástrojů a lze dokumentovat všechny výsledky měření.

Tabulka 5.8 – Technické parametry přístroje Zoller smarTcheck 450. [28]

Zoller smarTcheck 450		
Parametry stroje	Jednotky	Naměřené hodnoty
Měřicí rozsah osa Z	[mm]	450
Měřicí rozsah osa X		175
Maximální průměr nástroje		350
Měření průměru přes osu		35

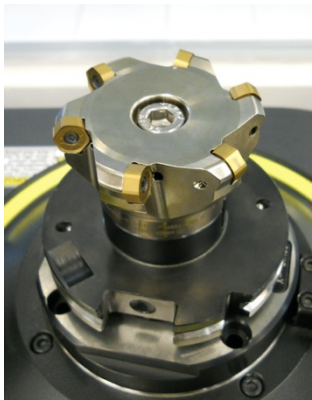
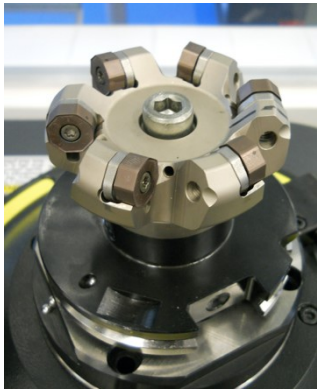

Kontrola axiální házivosti nástroje byla provedena před začátkem frézování na všech třech frézách od jednotlivých výrobců. Hlavním sledovaným parametrem byla řezná výška, kdy nám rozdíl největší a nejmenší výšky udává hodnotu axiální házivosti.

Viz tabulky níže – tabulka 5.9 pro frézy na uhlíkovou ocel C45 a tabulka 5.10 pro frézy na korozi-vzdornou ocel X2CrNiMo17-12-2.

Tabulka 5.9 – Axiální kontrola házivosti jednotlivých fréz pro materiál C45.

Druhy jednotlivých fréz osazených s upnutými VBD pro materiál C45		
Výrobce	Reálná fotografie	Naměřené hodnoty: [mm]
<p>Dormer Pramet Fréza: 63A06R-S45HN06C-C VBD: HNGX 0604 ANSN-M; M8330</p>		<p>Nejmenší: 75,091 Největší: 75,106 Rozdíl: 0,015</p>
<p>Sumitomo Fréza: DGCF 13063 RS VBD: ONMU 05T6ANER-G; ACP200</p>		<p>Nejmenší: 73,482 Největší: 73,492 Rozdíl: 0,010</p>
<p>Palbit Fréza: 063A90845-06-06-022040 VBD: ONKX 050505 ANSN-MP; PH 7920</p>		<p>Nejmenší: 75,153 Největší: 75,161 Rozdíl: 0,008</p>

Tabulka 5.10 – Axiální kontrola házivosti jednotlivých fréz pro materiál X2CrNiMo17-12-2.

Druhy jednotlivých fréz osazených s upnutými VBD pro materiál X2CrNiMo17-12-2		
Výrobce	Reálná fotografie	Výsledná házivost [mm]
<p>Dormer Pramet Fréza: 63A06R-S45HN06C-C VBD: HNGX 0604 ANSN-F; M6330</p>		<p>Nejmenší: 75,093 Největší: 75,111 Rozdíl: 0,018</p>
<p>Sumitomo Fréza: DGCF 13063 RS VBD: ONEU 05 T6 ANER-L; ACM 300</p>		<p>Nejmenší: 73,515 Největší: 73,536 Rozdíl: 0,021</p>
<p>Palbit Fréza: 063A90845-06-06-022040 VBD: ONHX 050505 ANEN-LP; PH7930</p>		<p>Nejmenší: 75,119 Největší: 75,167 Rozdíl: 0,048</p>

5.3 Funkční zkoušky obrábění

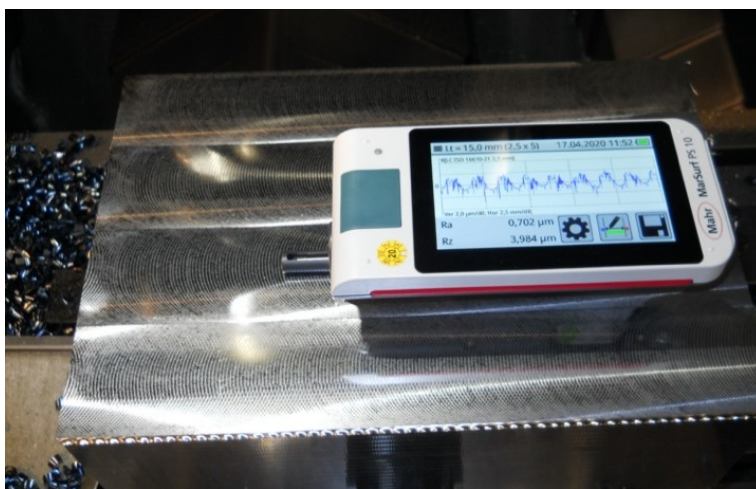
Osazené frézy po kontrole axiální házivosti byly připraveny pro funkční zkoušky obrábění. Výsledkem funkčních zkoušek obrábění je drsnost obrobené plochy se zatížením stroje vlivem obráběcího procesu v závislosti na měnících se řezných parametrech.

Funkční zkoušky jsou rozděleny do dvou skupin pro obrábění uhlíkové oceli C45 a korozivzdorné oceli X2CrNiMo17-12-2. Každá z těchto ocelí byla podrobena funkční zkoušce obrábění za použití vyměnitelných břitových destiček od třech různých výrobců (příslušné destičky pro uhlíkovou ocel i pro korozivzdornou ocel), a to od firmy Dormer Pramet dále od konkurenčních firem Sumitomo a Palbit.

Jedna funkční zkouška pro danou frézu zahrnuje celkem 4 obráběcí procesy, kdy každý proces je prováděn s rozdílným posuvem na zub (i posuvem samotným), nicméně s neměnnými řeznými parametry jako jsou: hloubka axiálního i radiálního řezu, otáčky potažmo řezná rychlost a pracovní prostředí.

Po každém obráběcím procesu s proměnlivým posuvem na zub byla změřena drsnost obrobené plochy přenosným dotykovým drsnoměrem MarSurft PS 10 s vyhodnocením dat do PDF souboru.

Výsledky jednotlivých funkčních zkoušek budou zobrazeny do grafu s příslušnými tabulkami naměřených hodnot a ovlivňujících řezných parametrů. Vzorová tabulka č. 5.12 funkční zkoušky pro vytvoření grafů.



Obrázek 5.4 – Měření drsnosti povrchu obrobené plochy dotykovým drsnoměrem MarSurft PS10.

5.3.1 Uhlíková ocel C45 (1.1191 / ČSN 12 050)

Uhlíková ocel C45 s doplňkovým označením 1 ve formě kvádrů s rozměry 200 x 300 x 180 mm byla upnuta do pracovního prostoru stroje a byla podrobena dvěma funkčním zkouškám čelního frézování s proměnlivým posuvem na zub (čtyři rozdílné posuvy na jednu zkoušku) a axiální hloubkou řezu 1 mm a 3 mm. Veškeré řezné parametry funkčních zkoušek pro tuto ocel a popis s označením nástroje a VBD jednotlivých výrobců jsou rozepsány v tabulce 5.11.

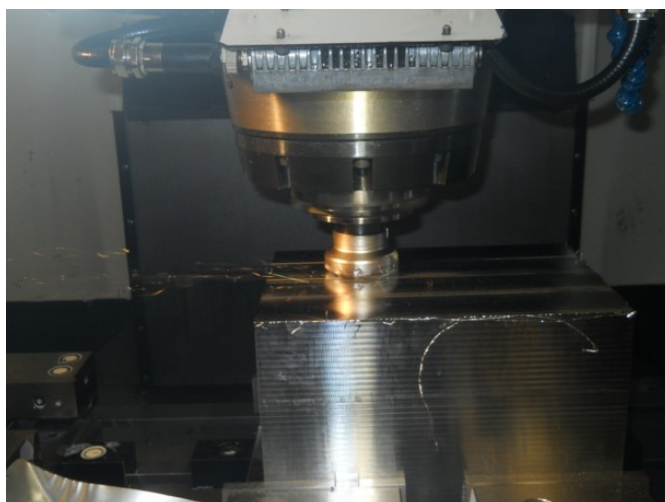
Tabulka 5.11 – Označení nástroje a VBD jednotlivých výrobců s rozsahem jejich řezných parametrů.

Označení nástroje a VBD										
Výrobce	Označení VBD	Materiál VBD	Typ povlaku	Typ VBD	Skupina	Obrobek	Prostředí	Nástroj	Nástroj	
					ISO 513	ČSN		Typ	Označení	
Dormer &Pramet	HNGX 0604ANSN -M	M8330	PVD	broušená	P	12 050.1	za sucha	nástrčná fréza	63A06R-S45HN06C-C	
Sumitomo	ONMU05T 6ANER-G	ACP200		přímolisovaná			za sucha	nástrčná fréza	DGCF 13063 RS	
Palbit	ONKX 050505AN SN-MP	PH7920					za sucha	nástrčná fréza	063A90845-06-06-022040	
Řezné parametry										
Rozsah ap	Volba ap	D	D _{ef}	a _e	Rozsah fz	z	f _{min}	Rozsah v _c	Volba v _c	n
[mm]					[mm/zub]	[-]	[mm/min]	[m/min]	[m/min]	[ot/min]
Dormer &Pramet	0,6 ÷ 3,0	63	65	50	0,13 ÷ 0,25	6	1668	308 ÷ 399	219,97584	1112
Sumitomo	max. 3,0	63	65	50	0,10 ÷ 0,50	6	1668	150 ÷ 250	219,97584	1112
Palbit	max. 3,5	63	65	50	0,10 ÷ 0,35	6	1668	170 ÷ 210	219,97584	1112

Funkční zkouška č. 1

Vzorové vyhodnocení první funkční zkoušky, která obsahuje 4 obráběcí procesy pro každého výrobce je zobrazeno v tabulce 5.12. Z tabulky je patrné, že u všech výrobců VBD jsou nastaveny stejné řezné parametry při jednotné hloubce axiálního řezu 1 mm. Každá VBD od daného výrobce je zkoušena celkem 4krát v suchém prostředí (bez chladicí kapaliny). Jedinou proměnnou u každého procesu je posuv na zub f_z (vlivem toho i posuv), který je odstupňován po jedné desetině mm – 0,15; 0,25; 0,35; 0,45 [mm/zub] – pro první funkční zkoušku, pro druhou je posuv na zub f_z odstupňován po 0,05 mm.

Výsledkem funkční zkoušky po obrobení plochy danými řeznými parametry a destičkou je naměřená drsnost povrchu R_a , R_z a zatížení stroje v průběhu obrábění. Drsnost povrchu byla změřena vždy na třech náhodných místech obrobené plochy dotykovým drsnoměrem MarSurf PS 10 (žlutě označené hodnoty v tabulce 5.12). Průměr těchto tří naměřených drsností se nachází na řádku 2,3 v tabulce 5.12 pod každým výrobcem.

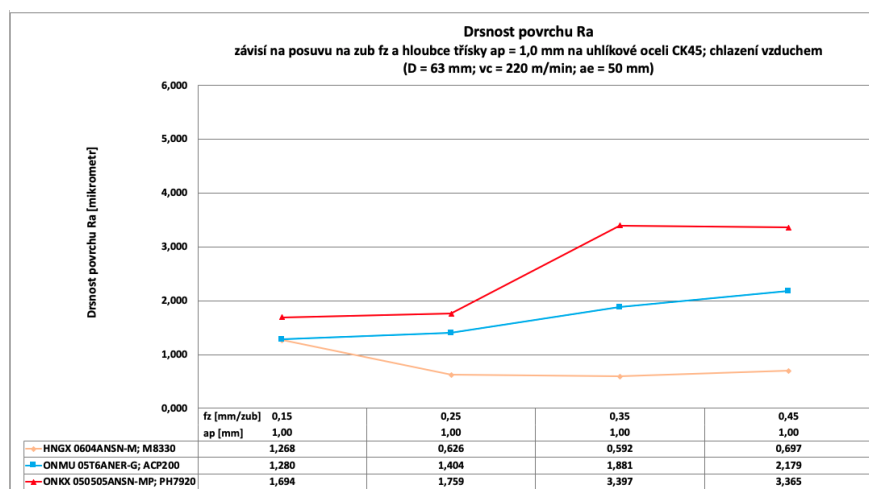


Obrázek 5.5 – Proces rovinného frézování.

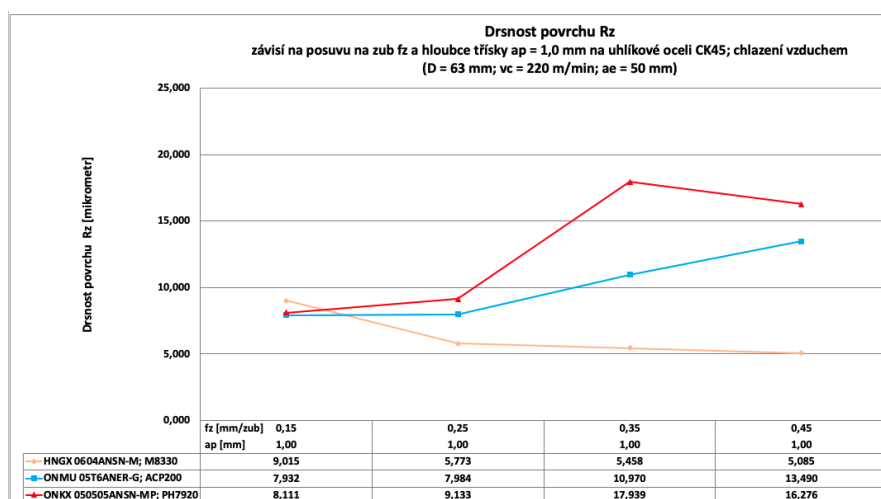
Tabulka 5.12 – Funkční zkouška č.1 pro uhlíkovou ocel C45 s řeznými parametry.

a_e = 50 mm	Dormer&Pramet	Destička: HNGX 0604ANSN-M; M8330 Fréza: 63A06R-S45HN06C-C				Mat.: C45; 155 HB Cooling: NO
ap	[mm]	1,00	1,00	1,00	1,00	vc
Ra	[μm]	1,268	0,626	0,592	0,697	220
Rz		9,015	5,773	5,458	5,085	D
Zatížení stroje	[%]	14/15	18	21-22	25	63
Posuv na zub f _z	[mm/zub]	0,15	0,25	0,35	0,45	D_{ef}
Posuv f	[mm/min]	970	1617	2264	2910	65
Zatížení stroje	[%]	14,5	18	21,5	25	z
1. Ra	[μm]	1,516	0,766	0,568	0,614	6
1. Rz		9,717	6,870	4,908	5,069	
2. Ra		1,105	0,685	0,644	0,694	
2. Rz		7,625	5,861	5,935	5,174	
3. Ra		1,183	0,427	0,563	0,782	
3. Rz		9,703	4,589	5,530	5,012	
a_e = 50 mm	Sumimoto	Destička: ONMU 05T6ANER-G; ACP200 Fréza: DGCF 13063 RS				Mat.: C45; 155 HB Cooling: NO
ap	[mm]	1,00	1,00	1,00	1,00	vc
Ra	[μm]	1,280	1,404	1,881	2,179	220
Rz		7,932	7,984	10,970	13,490	D
Zatížení stroje	[%]	24/25	21/22	40/42	51/53	63
Posuv na zub f _z	[mm/zub]	0,15	0,25	0,35	0,45	D_{ef}
Posuv f	[mm/min]	970	1617	2264	2910	65
Zatížení stroje	[%]	24,5	21,5	41	52	z
1. Ra	[μm]	0,981	1,614	1,839	2,469	6
1. Rz		6,813	8,933	11,823	13,585	
2. Ra		1,477	1,213	1,745	2,123	
2. Rz		8,720	7,410	10,461	13,928	
3. Ra		1,382	1,384	2,058	1,945	
3. Rz		8,264	7,609	10,625	12,957	
a_e = 50 mm	Palbit	Destička: ONKX 050505ANSN-MP; PH7920 Fréza: 063A90845-06-06-022040				Mat.: C45; 155 HB Cooling: NO
ap	[mm]	1,00	1,00	1,00	1,00	vc
Ra	[μm]	1,694	1,759	3,397	3,365	220
Rz		8,111	9,133	17,939	16,276	D
Zatížení stroje	[%]	12/13	15/17	18/20	22/24	63
Posuv na zub f _z	[mm/zub]	0,15	0,25	0,35	0,45	D_{ef}
Posuv f	[mm/min]	970	1617	2264	2910	65
Zatížení stroje	[%]	12,5	16	19	23	z
1. Ra	[μm]	1,473	1,911	3,656	3,229	6
1. Rz		6,865	8,658	18,633	15,696	
2. Ra		1,559	1,915	3,528	3,378	
2. Rz		6,839	10,615	18,620	16,521	
3. Ra		2,050	1,452	3,008	3,489	
3. Rz		10,630	8,126	16,563	16,612	

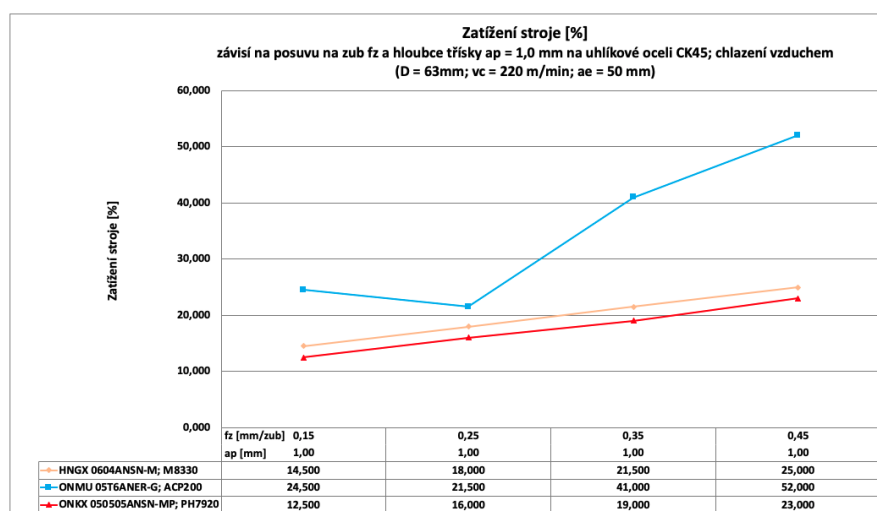
Součástí vyhodnocení každé funkční zkoušky je nejen tabulka s naměřenými hodnotami, ale i poměr jednotlivých výrobců z pohledu drsnosti plochy Ra, Rz a zatížení stroje zobrazený do grafu. U všech grafů bude zachována barevná odlišnost výrobců dle tabulky 5.12.



Graf 5.1 – Poměr drsnosti povrchu Ra.



Graf 5.2 – Poměr drsnosti povrchu Rz.

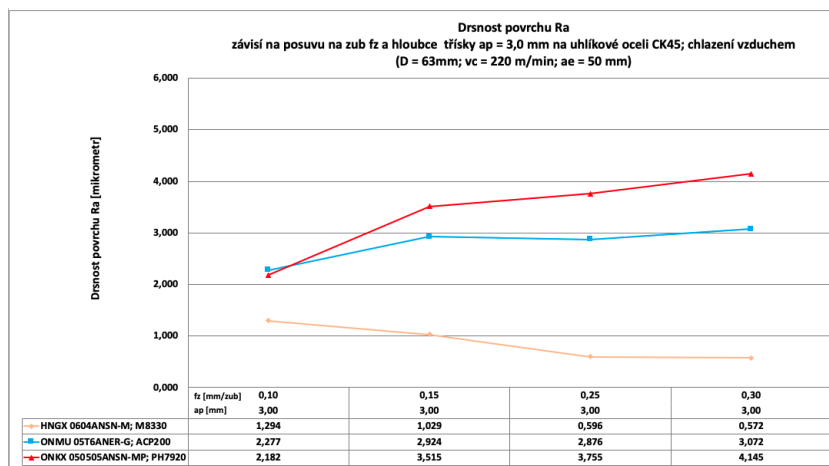


Graf 5.3 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.

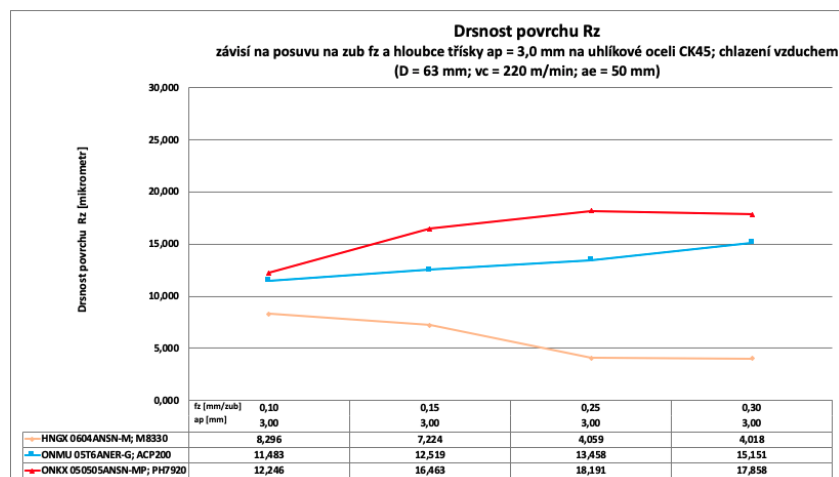
Funkční zkouška č. 2

Tabulka 5.13 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 2 pro všechny výrobce.

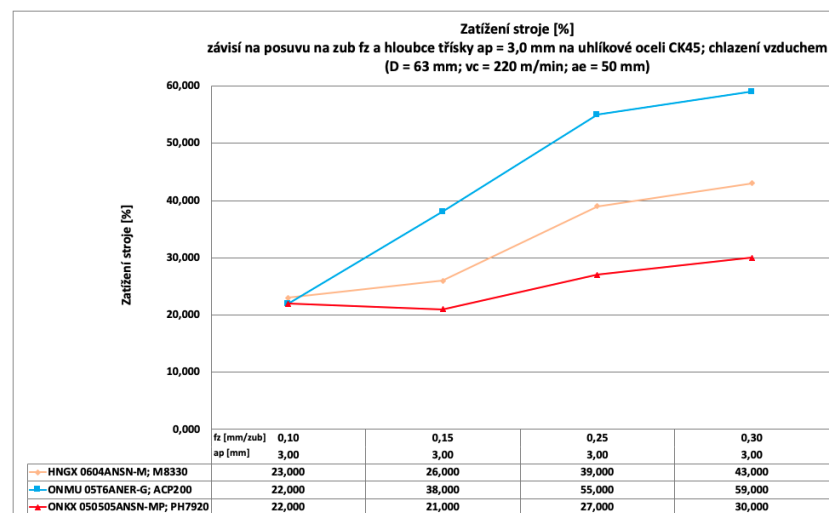
a_e	a_p	f_z	f	v_c	D	D_{ef}	z
[mm]	[mm]	[mm/zub]	[mm/min]	[m/min]	[mm]	[mm]	[-]
50	3	0,1 ÷ 0,3	609 ÷ 1828	220	63	69	6



Graf 5.4 – Poměr drsnosti povrchu R_a .



Graf 5.5 – Poměr drsnosti povrchu R_z .



Graf 5.6 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.

5.3.2 Korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349)

Obdobně jako u uhlíkové oceli byla korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2 ve tvaru kvádry 100 x 300 x 300 mm upnuta do pracovního stroje a byla podrobena celkem čtyřem funkčním zkouškám. Funkční zkoušky u této oceli byly rozděleny do dvou skupin vlivem použití chladicího média na obrábění s procesní kapalinou a obrábění se stlačeným vzduchem. Obě skupiny byly podrobeny dvěma funkčním zkouškám s axiální hloubkou řezu 1 a 2 mm. Každá funkční zkouška obsahovala 4 obráběcí procesy s proměnným posuvem na zub f_z odstupňovaným po 0,05 mm/zub (jeden po 0,1 mm/zub) – 0,1 ÷ 0,3 mm/zub.

Níže je zobrazena tabulka č. 5.14. s nástroji a VBD jednotlivých výrobců s rozsahem jejich řezných parametrů. Dále bude uvedeno vyhodnocení jednotlivých funkčních zkoušek do grafů.

Tabulka 5.14 – Označení nástroje a VBD jednotlivých výrobců s rozsahem jejich řezných parametrů.

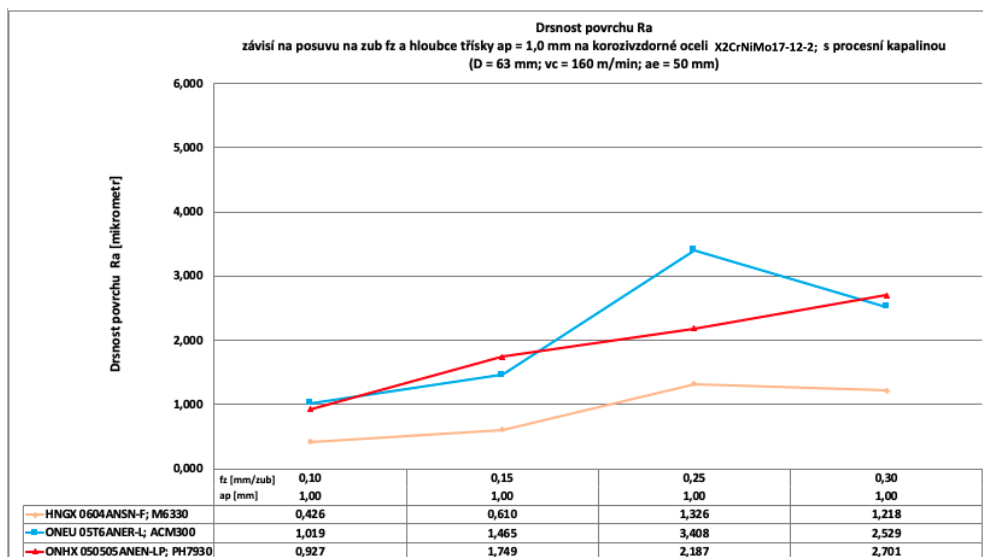
Označení nástroje a VBD										
Výrobce	Označení VBD	Materiál VBD	Typ povlaku	Typ VBD	Skupina	Obrobek	Prostředí	Nástroj	Nástroj	
					ISO 513	ČSN		Typ	Označení	
Dormer &Pramet	HNGX 0604ANSN-F	M6330	PVD	broušená	M	17349.4	2x za sucha 2x s procesní kapalinou	nástrčná fréza	63A06R-S45HN06C-C	
Sumimoto	ONEU 05T6ANER-L	ACM300						nástrčná fréza	DGCF 13063 RS	
Palbit	ONHX 050505ANEN-LP	PH7930						nástrčná fréza	063A90845-06-06-022040	
Řezné parametry										
Rozsah a _p	Volba a _p	D	D _{ef}	a _e	Rozsah f _z	z	f _{min}	Rozsah v _c	Volba v _c	n
[mm]					[mm/zub]	[-]	[mm/min]	[m/min]		[ot/min]
Dormer &Pramet	0,6 ÷ 3,0	63	65 ÷ 67	50	0,08 ÷ 0,17	6	728,1	184 ÷ 242	160,03638	809
Sumimoto	max. 3,0	63	65 ÷ 67	50	0,15 ÷ 0,30	6	728,1	160 ÷ 250	160,03638	809
Palbit	max. 3,5	63	65 ÷ 67	50	0,10 ÷ 0,30	6	728,1	100 ÷ 160	160,03638	809

a) Obrábění s procesní kapalinou

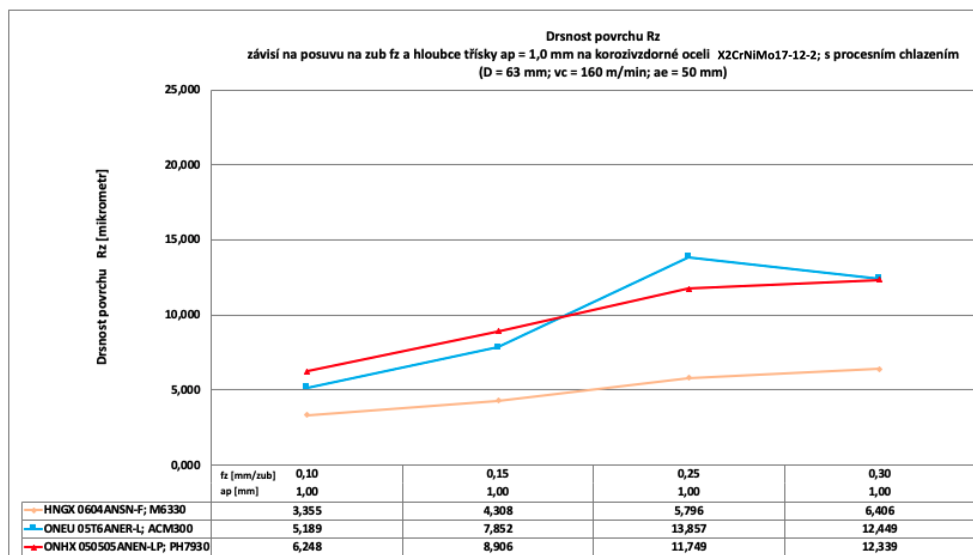
Funkční zkouška č.1

Tabulka 5.15 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 1 pro všechny výrobce.

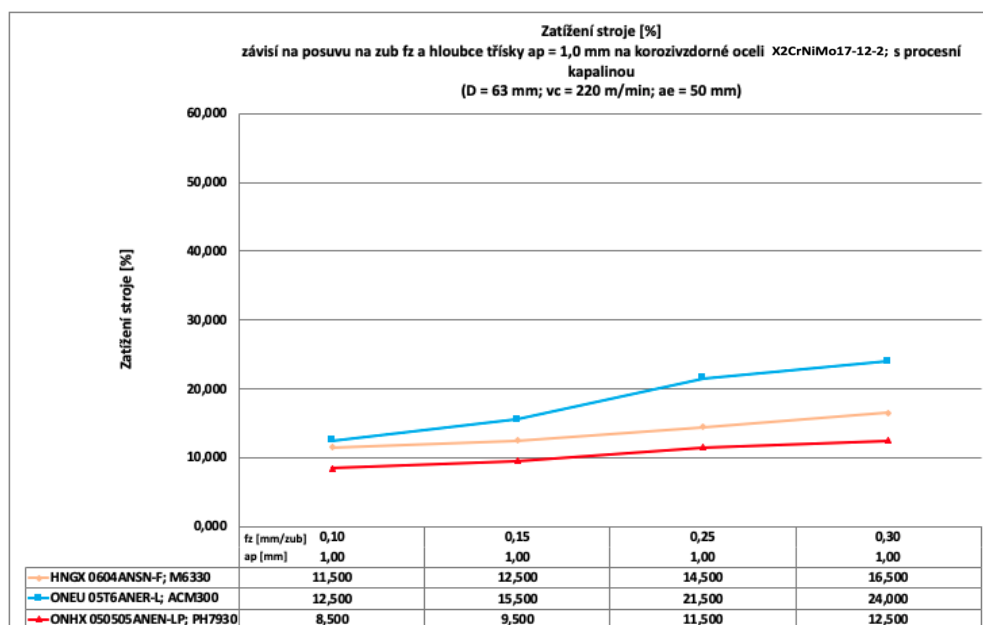
a_e	a_p	f_z	f	v_c	D	D_{ef}	z
[mm]	[mm]	[mm/zub]	[mm/min]	[m/min]	[mm]	[mm]	[-]
50	1	0,1 ÷ 0,3	470 ÷ 1411	160	63	65	6



Graf 5.7 – Poměr drsnosti povrchu Ra.



Graf 5.8 – Poměr drsnosti povrchu Rz.

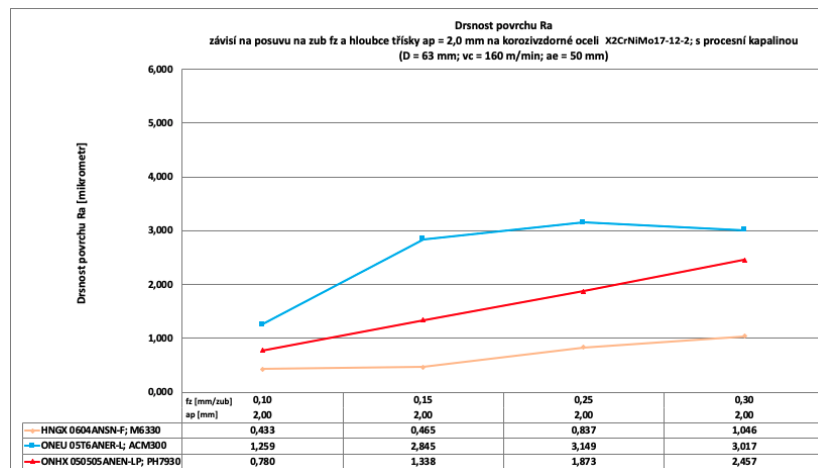


Graf 5.9 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.

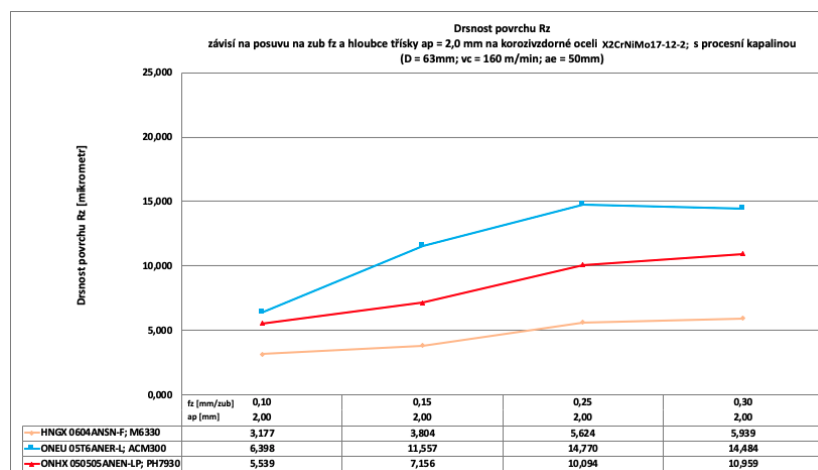
Funkční zkouška č. 2

Tabulka 5.16 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 2 pro všechny výrobce.

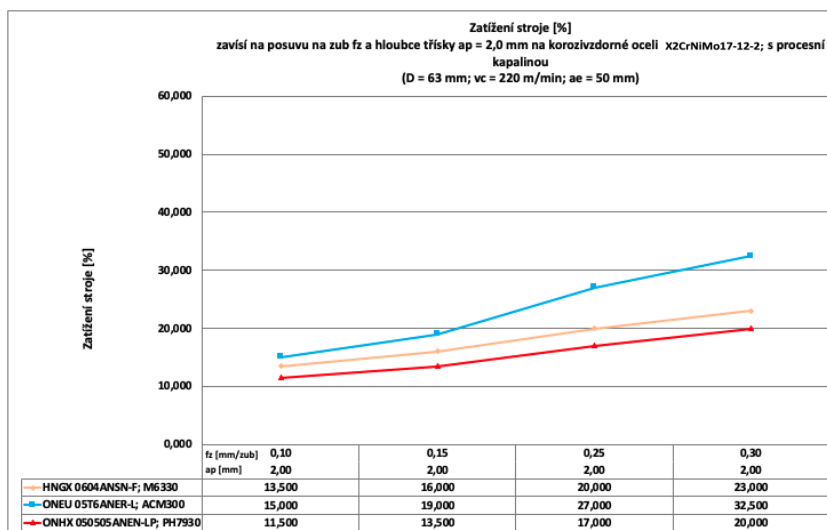
a_e	a_p	f_z	f	v_c	D	D_{ef}	z
[mm]	[mm]	[mm/zub]	[mm/min]	[m/min]	[mm]	[mm]	[-]
50	2	0,1 ÷ 0,3	456 ÷ 1369	160	63	67	6



Graf 5.10 – Poměr drsnosti povrchu R_a .



Graf 5.11 – Poměr drsnosti povrchu R_z .



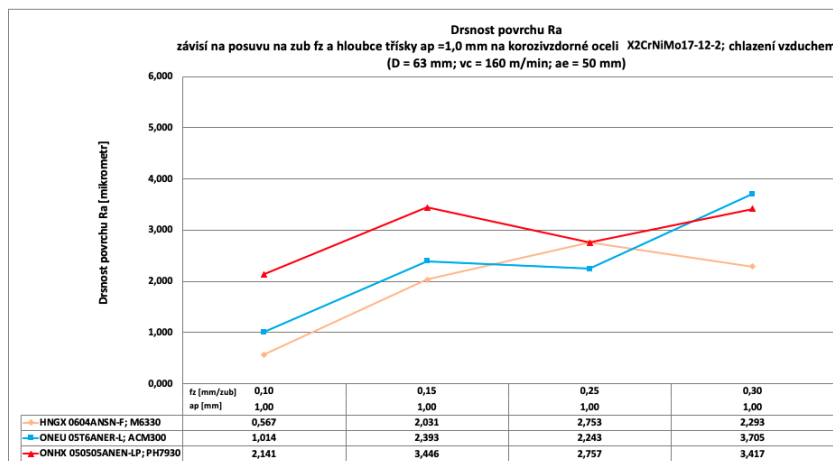
Graf 5.12 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.

b) Obrábění se stlačeným vzduchem

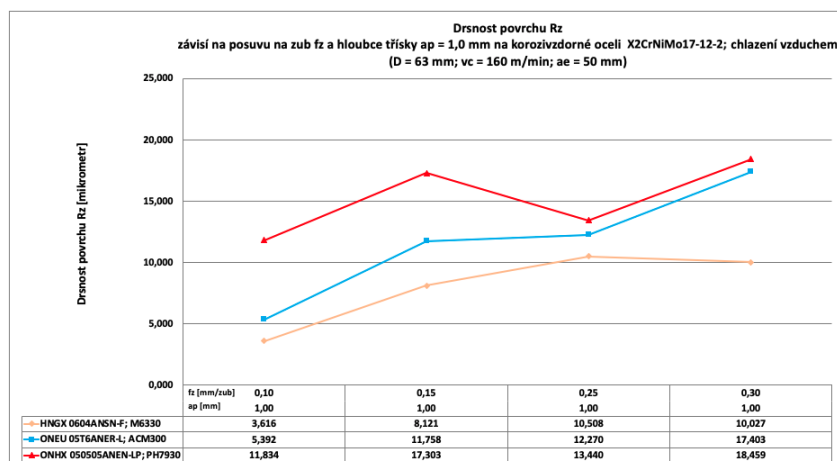
Funkční zkouška č. 3

Tabulka 5.17 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 3 pro všechny výrobce.

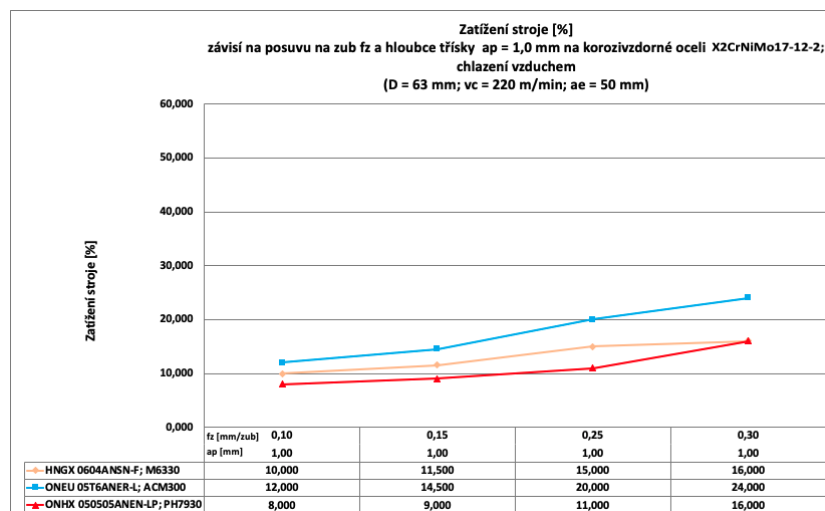
a_e	a_p	f_z	f	v_c	D	D_{ef}	z
[mm]	[mm]	[mm/zub]	[mm/min]	[m/min]	[mm]	[mm]	[-]
50	1	0,1 ÷ 0,3	470 ÷ 1411	160	63	65	6



Graf 5.13 – Poměr drsnosti povrchu R_a .



Graf 5.14 – Poměr drsnosti povrchu R_z .



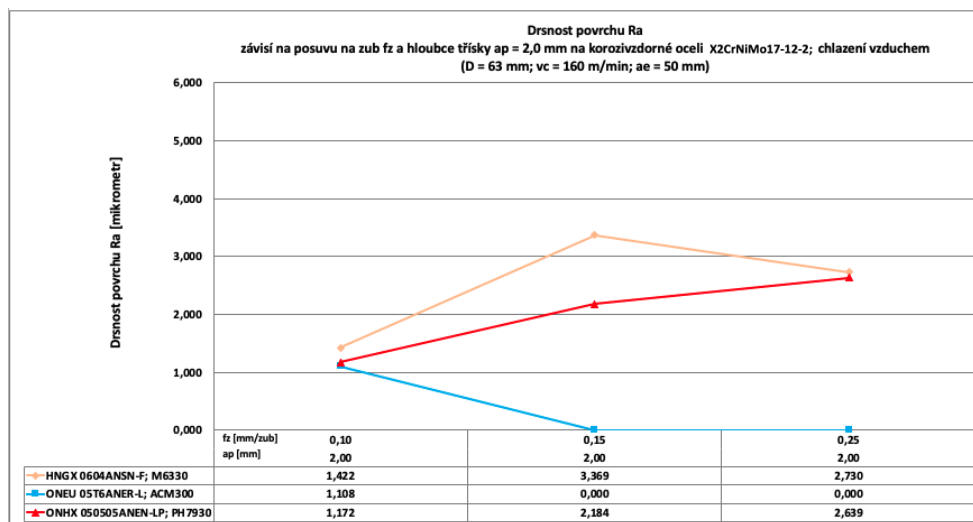
Graf 5.15 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.

Funkční zkouška č. 4

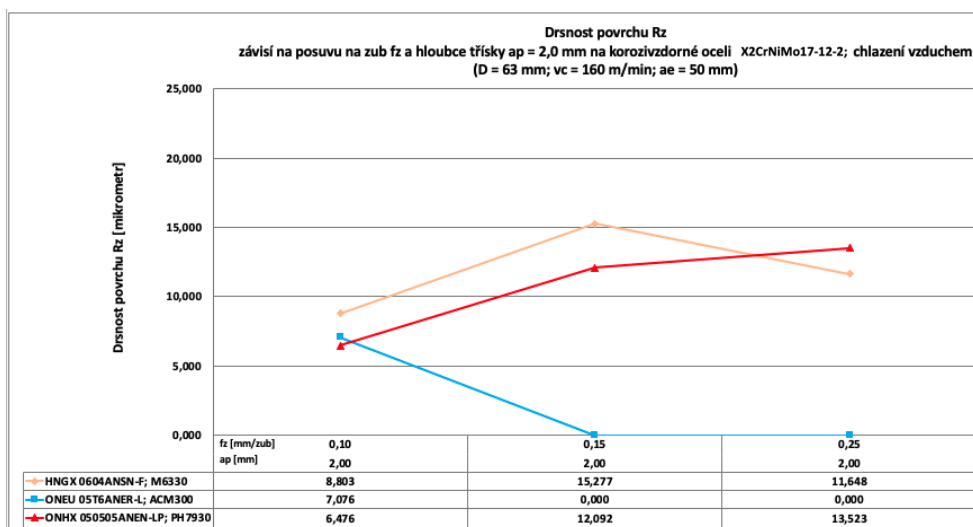
U poslední provedené zkoušky na korozivzdorné oceli došlo k situacím obráběcího procesu, kdy nebylo možné dosáhnout výsledku. Při hloubce třísky 2 mm bylo u některých fréz zjevné, že by mohlo dojít k poškození destičky potažmo hlavy frézy. U jednotlivých fréz a VBD se tyto situace liší v závislosti na posuvu na zub. Např. u frézy Sumitomo bylo možno uskutečnit pouze jeden obráběcí proces ($f_z = 0,1$ mm/zub) funkční zkoušky oproti třem procesům frézami Dormer Pramet s.r.o a Palbit ($f_z = 0,1; 0,15; 0,25$).

Tabulka 5.18 – Funkční zkouška č. 4 pro korozivzdornou ocel X2CrNiMo17-12-2 s řeznými parametry.

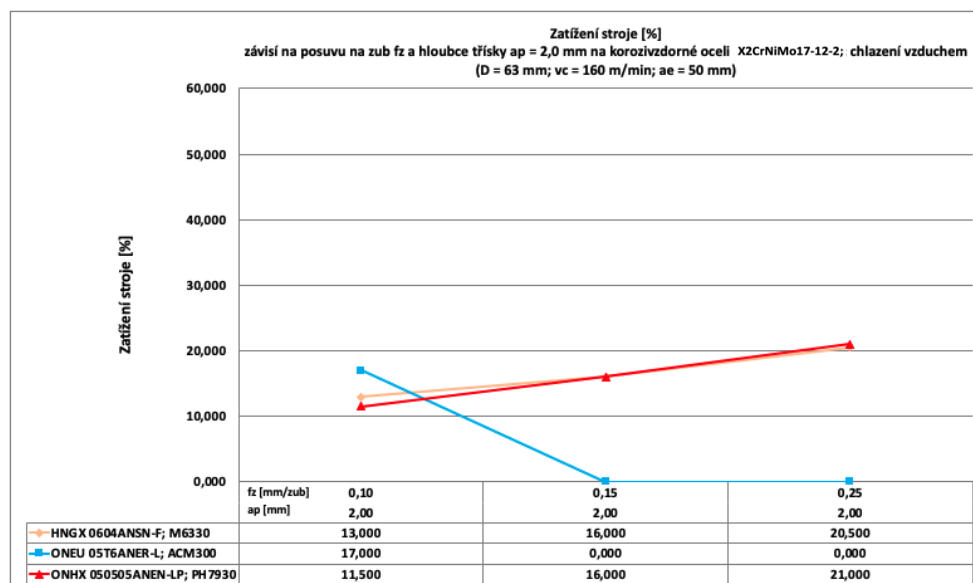
$a_e = 50$ mm	Dormer&Pramet	Destička: HNGX 0604ANSN-F; M6330 Fréza: 63A06R-S45HN06C-C				Mat.: X2CrNiMo-17-12-2; 155 HB Chlazení: stlačený vzduch
ap	[mm]	2,00	2,00	2,00	2,00	vc
Ra	[μm]	1,422	3,369	2,730	0,000	160
Rz		8,803	15,277	11,648	0,000	D
Zatížení stroje	[%]	12/14	15/17	20/21	0	63
Posuv na zub f_z	[mm/zub]	0,10	0,15	0,25	0,30	D_{ef}
Posuv f	[mm/min]	456	684	1141	1369	67
Zatížení stroje	[%]	13	16	20,5	0	z
1. Ra	[μm]	1,924	2,741	3,248	0,000	6
1. Rz		11,832	8,750	13,696	0,000	
2. Ra		1,044	3,323	2,371	0,000	
2. Rz		7,044	14,229	9,458	0,000	
3. Ra		1,298	4,042	2,570	0,000	
3. Rz		7,534	22,853	11,790	0,000	
$a_e = 50$ mm	Sumitomo	Destička: ONEU 05T6ANER-L; ACM300 Fréza: DGCF13063 RS				Mat.: X2CrNiMo-17-12-2; 155 HB Chlazení: stlačený vzduch
ap	[mm]	2,00	2,00	2,00	2,00	vc
Ra	[μm]	1,108	0,000	0,000	0,000	160
Rz		7,076	0,000	0,000	0,000	D
Zatížení stroje	[%]	16/18	0	0	0	63
Posuv na zub f_z	[mm/zub]	0,10	0,15	0,25	0,30	D_{ef}
Posuv f	[mm/min]	456	684	1141	1369	67
Zatížení stroje	[%]	17	0	0	0	z
1. Ra	[μm]	1,047	0,000	0,000	0,000	6
1. Rz		6,897	0,000	0,000	0,000	
2. Ra		1,018	0,000	0,000	0,000	
2. Rz		7,047	0,000	0,000	0,000	
3. Ra		1,260	0,000	0,000	0,000	
3. Rz		7,283	0,000	0,000	0,000	
$a_e = 50$ mm	Palbit	Destička: ONHX 050505ANEN-LP; PH7930 Fréza: 063A90845-06-06-022040				Mat.: X2CrNiMo-17-12-2; 155 HB Chlazení: stlačený vzduch
ap	[mm]	2,00	2,00	2,00	2,00	vc
Ra	[μm]	1,172	2,184	2,639	0,000	160
Rz		6,476	12,092	13,523	0,000	D
Zatížení stroje	[%]	11/12	15/17	20/22	0	63
Posuv na zub f_z	[mm/zub]	0,10	0,15	0,25	0,30	D_{ef}
Posuv f	[mm/min]	456	684	1141	1369	67
Zatížení stroje	[%]	11,5	16	21	0	z
1. Ra	[μm]	0,952	2,086	2,424	0,000	6
1. Rz		6,451	11,510	11,930	0,000	
2. Ra		0,934	2,111	2,799	0,000	
2. Rz		4,806	11,892	15,850	0,000	
3. Ra		1,630	2,356	2,693	0,000	
3. Rz		8,170	12,874	12,789	0,000	



Graf 5.16 – Poměr drsnosti povrchu Ra.



Graf 5.17 – Poměr drsnosti povrchu Rz.



Graf 5.18 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.

5.4 Obráběcí zkouška na trvanlivost

Tato zkouška bohužel nebyla uskutečněna z důvodu vzniku celosvětové pandemie COVID19. Kvůli této nepříjemné situaci byly vyhlášeny striktní ochranná opatření a společnost Dormer Pramet s.r.o byla na měsíc uzavřena, a i pozdější provoz firmy byl z velké části omezen na minimum, tudíž nebylo možné využít potřebné prostory a také veškeré vybavení k dokončení všech zkoušek.

Vzhledem k velké časové prodlevě nebylo v našich silách ani možnostech tento experiment uskutečnit.

6 Technicko-ekonomické zhodnocení

Na základě zjištěných parametrů, které jsou zřetelné z výše uvedených grafů můžeme porovnat výrobce Dormer Pramet s.r.o., Sumitomo a Palbit z pohledu vyhodnocení drsnosti obrobeného povrchu, zatížení stroje obráběcím procesem a také z pohledu pořizovacích cen nástrojů.

Na výslednou drsnost povrchu měly největší vliv proměnné parametry axiální hloubky řezu a_p a posuvu na zub f_z . Každá funkční zkouška obsahovala čtyři obráběcí procesy s proměnným posuvem na zub f_z a neměnnou hodnotou axiální hloubky řezu a_p

6.1 Vyhodnocení funkčních zkoušek

Drsnost povrchu byla vyhodnocována na dvou typech obráběných materiálů. Prvním z nich byla uhlíková ocel C45, kdy chladicím médiem byl stlačený vzduch. Tato ocel byla podrobena dvěma funkčním zkouškám s hodnotou axiální hloubky řezu a_p 1 a 3 mm. Na základě výsledných grafů dvou funkčních zkoušek uvedených v kapitole 5.3, můžeme konstatovat, že ze všech tří porovnávaných výrobců měla obrobená plocha nástrojem firmy Dormer Pramet s.r.o. nejmenší drsnost povrchu R_a i R_z . Druhá nejmenší drsnost byla dosažena nástrojem od konkurenční firmy Sumitomo. Nejhorší vliv na drsnost povrchu měl nástroj od firmy Palbit. Nejmenší zatížení stroje vykazoval nástroj od firmy Sumitomo, dále Dormer Pramet s.r.o. a nejhůře si v tomto případě vedl opět nástroj od firmy Palbit.

Druhým zkoušeným materiálem byla korozivzdorná ocel X2CrNiMo17-12-2, která byla podrobena čtyřem funkčním zkouškám. Tyto zkoušky probíhaly ve dvou různých prostředích. Pro každé prostředí byly vyhodnoceny dvě funkční zkoušky s hloubkou axiálního řezu a_p 1 a 2 mm. V prvním případě byla použita procesní kapalina, kde můžeme na základě grafů z kapitoly 5.3 vyčíst, že si nejlépe vedla z hlediska drsnosti povrchu firma Dormer Pramet s.r.o., dále firma Palbit a v poslední řadě firma Sumitomo. Nejmenší zatížení stroje za použití procesní kapaliny prokázal nástroj od firmy Palbit, dále Dormer Pramet s.r.o. a jako poslední od firmy Sumitomo. Ve druhém případě pro zbylé dvě funkční zkoušky č.3 a č.4 byl chladicím médiem stlačený vzduch. V případě funkční zkoušky číslo 3 dosahoval nejmenší drsnosti povrchu nástroj od firmy Dormer Pramet s.r.o. a zbylé dva nástroje od firem Sumitomo a Palbit si vedly obdobně. Stroj byl nejméně zatížen nástrojem od firmy Sumitomo, dále Dormer Pramet s.r.o. a nejvíce zatížen byl za použití nástroje od firmy Palbit. Funkční zkouška č. 4 nebyla plně vyhodnocena, jelikož bylo zjevné, že při některých zvolených řezných parametrech, nástroje nejsou schopny zajistit správný průběh obráběcího procesu.

6.2 Ekonomické vyhodnocení z pohledu pořizovacích cen

Na základě pořizovacích cen frézovacích hlav a VBD jsme byli schopni vypočítat cenu za jeden břit u všech konkurentů a následně porovnat ten z nich, který vycházel cenově nejprůběžněji. Všechny tyto data jsou uvedeny v tabulkách 6,1 a 6.2.

Ceny, které jsou uvedeny u konkurentů nakupuje firma Dormer Pramet s.r.o. přes své distributory se slevou zhruba 20 % až 30 % na frézy a 30 % na VBD. Prodejní ceny u firmy Dormer Pramet s.r.o. jsou průměrné, za které prodává firma sortiment svým zákazníkům.

Tabulka 6.1 – Ceny jednotlivých fréz a VBD uvedených výrobců.

Výrobce	Fréza	
	Označení	Cena 1 ks frézy [Kč bez DPH]
Dormer Pramet	63A06R-S45HN06C-C	2950,-
Sumimoto	DGCF 13063 RS	10 310,-
Palbit	063A90845-06-06-022040	6678,-
Výrobce	VBD na uhlíkovou ocel C45	
	Označení	Cena 10 ks VBD [Kč bez DPH]
Dormer Pramet	HNGX 0604ANSN-M; M8330	1800,-
Sumimoto	ONMU 05T6ANER-G; ACP200	3275,-
Palbit	ONKX 050505ANSN-MP; PH7920	2345,-
Výrobce	VBD na korozivzdornou ocel X2CrNiMo17-12-2	
	Označení	Cena 10 ks VBD [Kč bez DPH]
Dormer Pramet	HNGX 0604ANSN-F; M6330	1800,-
Sumimoto	ONEU 05T6ANER-L; ACM300	3685,-
Palbit	ONHX 050505ANEN-LP; PH7930	2940,-

Tabulka 6.2 – Ceny VBD přepočteny na jeden břit.

Výrobce	VBD na uhlíkovou ocel C45	
	Označení	Cena 1 břitu VBD [Kč bez DPH]
Dormer Pramet	HNGX 0604ANSN-M; M8330	15,-
Sumimoto	ONMU 05T6ANER-G; ACP200	21,-
Palbit	ONKX 050505ANSN-MP; PH7920	15,-
Výrobce	VBD na korozivzdornou ocel X2CrNiMo17-12-2	
	Označení	Cena 1 břitu VBD [Kč bez DPH]
Dormer Pramet	HNGX 0604ANSN-F; M6330	15,-
Sumimoto	ONEU 05T6ANER-L; ACM300	23,-
Palbit	ONHX 050505ANEN-LP; PH7930	19,-

Závěr

Cílem diplomové práce bylo zhodnocení ekonomického frézování rovinných ploch s úhlem $\kappa_r = 45^\circ$ na dvou materiálech, a to na uhlíkové oceli **C45** a korozivzdorné oceli **X2CrNiMo17-12-2**. Posouzení ekonomického frézování rovinných ploch bylo vyhodnoceno z pohledu funkční zkoušky zabývající se výslednou drsností povrchu a zkoušky trvanlivosti břitu. K experimentu byly použity nástroje (frézovací hlava i VBD) firmy Dormer Pramet s.r.o. a dalších dvou konkurentů: japonské firmy Sumitomo a portugalské firmy Palbit.

Před začátkem experimentálních zkoušek, bylo nejprve nutné provést osazení frézovacích hlav příslušnými břitovými destičkami; celkem 6 VBD na jednu frézovací hlavu.

Dále bylo nutné provést několik následujících kontrol. První z nich se zabývala měřením tvrdosti obou obráběných materiálů za pomoci přístroje Proceq Equotip HW.C1. Poté následovala axiální kontrola házivosti nástroje u všech tří firem na přístroji Zoller smarTcheck 450. Po těchto úkonech bylo nutné osazené frézovací hlavy připevnit pomocí válcového šroubu do nástrčných upínačů s kuželovou stopkou pro upnutí do vřetena stroje.

V experimentální části obrábění byly nejprve provedeny funkční zkoušky z hlediska dopadu zvolených řezných parametrů na výslednou drsnost obrobeného povrchu a zatížení obráběcího stroje vlivem procesu rovinného frézování. Dále mělo dojít ke zkouškám trvanlivosti břitu nástroje. Tyto zkoušky však nebylo možné uskutečnit, vzhledem k celosvětové pandemii COVID19, kvůli které byla firma na měsíc uzavřena, a i její další provoz byl výrazně omezen. Tento výpadek bohužel způsobil skutečnost, že experimentální zkoušky nemohly být dokončeny v plném rozsahu.

V celkovém zhodnocení můžeme tedy konstatovat alespoň výsledné porovnání zvolených VBD od všech tří společností za použití dvou různých obráběných materiálů s variací řezných parametrů na drsnost obrobeného povrchu a zatížení stroje. Dále bylo možné zhodnotit z ekonomického pohledu pořizovací náklady na veškerý sortiment a vypočítat cenu na jeden břit od společnosti Dormer Pramet s.r.o s jeho dvěma konkurenty a tím zjistit, která z firem si v tomto směru vede nejlépe.

Poděkování

V první řadě bych ráda poděkovala společnosti Dormer Pramet s.r.o za veškeré podmínky a prostory, které zajistila pro realizaci této práce i přes vzniklou složitou situaci, která celý průběh ztížila všem, kteří se na práci podíleli. Velký dík patří Ing. Martinu Binderovi Ph.D. za jeho vstřícnost a cenné rady při společných konzultacích. Také děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladímíru Vrbovi, CSc. za jeho přístup a rady k úspěšnému dokončení diplomové práce.

Diplomová práce byla vypracována za podpory projektu: „Specifický výzkum inovativních technologií výroby“, reg. č. „SP2020/27“ Specifického výzkumu financovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Použitá literatura

1. Frézování . Document Moved [online]. Copyright © Dormer Pramet [cit. 10.02.2020]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/cs-cz/products/milling/milling>
2. Třískové obrábění II Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích Institute of Technology And Business In České Budějovice. [online]. Copyright © 2020 [cit. 10.02.2020]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/6886889/>
3. KOČMAN, K. Speciální technologie obrábění. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1993. 213 s. ISBN 80-214-1187-2.
4. AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
5. Nástroje s VBD : Maxxtool. Maxxtool [online]. Copyright © 2017, MAXXTOOL s.r.o. [cit. 15.02.2020]. Dostupné z: <https://www.maxxtool.cz/nastroje-s-vbd/>
6. BRYCHTA, J. Výrobní stroje obráběcí. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 2003. 150 s. ISBN 80-248-0237-6.
7. Výroba VBD a druhy povlaků. [online]. Copyright © Dormer Pramet [cit. 20.02.2020]. Dostupné z: http://www.taegutec.cz/innotool/prirucka_obrazeni_331.pdf?fbclid=IwAR1Rjekk7CpAzPZlplUCZowXUPlilHeYiZ3UJfSwnvbAvBRKb7Wr5T2N_Hw
8. BILÍK, O. Obrábění II. (2.Díl). Ostrava: Vysoká škola báňská –TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-994-1.
9. Čelní frézování. Document Moved [online]. Copyright © Sandvik Coromant [cit. 20.02.2020]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>
10. HUMAR, Anton. Slinuté karbidy a řezná keramika pro obrábění. 1. vydání. Brno: CCB spol. s.r.o 1995. 265 s. ISBN 80-85825-10-4.
11. Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. [online] [cit. 25.02.2020] Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cuttig - A Practical Handbook. Dostupné z: <http://AB SANDVIK COROMANT - SANDVIK CZ s.r.o.> ISBN 91-97 22 99-4-6.
12. HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje. Praha: MM Publishing, 2008. ISBN isbn978-80-254-2250-2.
13. KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. Technologie obrábění. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. ISBN isbn80-214-3068-0.

14. Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN isbn91-972299-4-6.
15. Trendy v povlakování slinutých karbidů. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 01.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
16. ŘASA, Jaroslav, Přemysl POKORNÝ a Vladimír GABRIEL. Strojírenská technologie 3. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN sbn80-718-3336-3
17. Přehled nanotechnologií a nanomateriálů. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 01.03.2020]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8705547-Prehled-nanotechnologii-a-nanomaterialu.html>
18. KOČMAN, Karel. Technologické procesy obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN isbn978-80-7204-722-2.
19. Příručka pro technology - Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 12.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-jak-rozpoznat-spravne-utvareni-trisek.html>
20. Příručka obrábění - optimální volba a použití nástroj Pramet Diadur. PRAMET TOOLS, s.r.o., Šumperk. PRIR 0398-CZ. 1998. 198 s.
21. MACEK, Karel a Petr ZUNA. Strojírenské materiály. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN isbn80-01-02798-8.
22. Příručka obrábění: kniha pro praktiky. Praha: Sandvik Coromant, 1997. ISBN isbn91-972299-4-6.
23. Trochoidní frézování. Nástrojárna [online]. Copyright © 2020 INFOCUBE s.r.o. [cit. 14.03.2020]. Dostupné z: <https://nastrojarna.oneindustry.one/proc-pouzivat-strategii-trochoidniho-frezovani/>
24. Evoluce v trochoidním frézování | WNT. Zerspanungswerkzeuge | Wendeschneidplatten | WNT [online]. Copyright © CERATIZIT Česká republika s.r.o. [cit. 14.03.2020]. Dostupné z: <https://www.wnt.com/cz/zpravy/evoluce-v-trochoidnim-frezovani-925.html>
25. HSC obrábění rotačních obrobků. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2020 www.mmspektrum.com [cit. 25.03.2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hsc-obrabeni-rotacnich-obrobku.html>
26. PÍŠKA, Miroslav. Speciální technologie obrábění. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN isbn978-80-214-4025-8.

27. MCV 1270 | KOVOSVIT MAS. Obráběcí stroje, CNC stroje, CNC soustruhy | KOVOSVIT MAS [online]. Copyright © KOVOSVIT MAS 2016 [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-1270-p9.html>
28. Zoller | Měřicí a seřizovací přístroje ZOLLER [online]. Copyright © [cit. 15.04.2020]. Dostupné z: <http://www.zoller.cz/wp-content/uploads/2014/04/smarTcheck-600.pdf>
29. Japonská společnost Sumitomo Corporation Ltd. [online]. Copyright © Svět v bezpečí s.r.o. [cit. 19.04.2020]. Dostupné z: <https://autoperiskop.cz/japonska-spolecnost-sumitomo-corporation-ltd-rozsiruje-aktivitu-v-cr/>
30. Palbit, s.a. - Cutting tools, Industrial tools & Rock tools. [online]. Copyright © 2018 Palbit . All rights reserved [cit. 20.04.2020]. Dostupné z: <https://www.palbit.pt/en/>

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 – Aktuální logo společnosti. [1]	- 11 -
Obrázek 1.2 – Příklady typů VBD. [5]	- 12 -
Obrázek 1.3 – Mikrostruktura karbidů. [7]	- 12 -
Obrázek 1.4 – Průběh výroby SK (1 - výroba směsi prášků, 2 - lisování polotovarů, 3 - slinování, 4 - broušení destiček, 5 - povlakování destiček). [11]	- 13 -
Obrázek 1.5 – Princip slinování: a) před slinováním, b) po slinování. [14]	- 14 -
Obrázek 1.6 – Rozhraní podkladu - povlak. [10]	- 15 -
Obrázek 1.7 – Schéma tvorby povlaků metodou: a) PVD, b) CVD. [18]	- 17 -
Obrázek 1.8 – Obecné ISO značení pro VBD. [8]	- 18 -
Obrázek 1.9 – Rozdělení obráběných materiálů dle normy ISO 513. [12]	- 18 -
Obrázek 1.10 – Rovinná fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami. [1]	- 20 -
Obrázek 2.1 – Členění plastické deformace. [18]	- 22 -
Obrázek 2.2 – Druhy a tvary třísek. [18]	- 24 -
Obrázek 2.3 – Schéma utváření třísky. [12]	- 25 -
Obrázek 2.4 – Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástroje. [20]	- 26 -
Obrázek 2.5 – Klasifikace druhů opotřebení. [22]	- 28 -
Obrázek 2.6 – Čelní frézování. [10]	- 29 -
Obrázek 2.7 – Válcové frézování: a) nesousledné, b) sousledné. [10]	- 29 -
Obrázek 2.8 – Hlavní oblasti použití frézovacích koncepcí. [9]	- 30 -
Obrázek 2.9 – Směr řezných sil při různém úhlu nastavení. [9]	- 30 -
Obrázek 2.10 – Použití jednotlivých úhlů nastavení. [22]	- 31 -
Obrázek 2.11 – Frézování přes místa porušující celistvost. [22]	- 32 -
Obrázek 2.12 – Frézování tenkostěnných a poddajných partií. [22]	- 33 -
Obrázek 2.13 - Frézování obrysů tenkostěnných partií za pomoci čelní frézy. [9]	- 33 -
Obrázek 2.14 – Okružní frézování: a) vnější, b) vnitřní. [10]	- 34 -
Obrázek 2.15 – Planetové frézování: a) vnější, b) vnitřní. [10]	- 34 -
Obrázek 3.1 – Schéma trochoidního frézování po kruhové interpolaci se současným posuvem vpřed v radiálním směru (spirálová dráha). [23]	- 35 -
Obrázek 3.2 – Porovnání HSC obrábění vůči konvenčnímu obrábění. [25]	- 36 -
Obrázek 4.1 – Frézovací hlava a destičky od firmy Dormer Pramet	- 39 -
Obrázek 4.2 – Frézovací hlava a destičky od firmy Sumitomo.	- 40 -
Obrázek 4.3 – Frézovací hlava a destičky od firmy Palbit	- 40 -
Obrázek 4.4 – Obráběcí stroj MCV 1270 Power od firmy Kovosvit MAS.	- 41 -
Obrázek 5.1 – Osazení jednotlivých fréz	- 44 -
Obrázek 5.2 – Měření drsnosti povrchu přístrojem Proceq Equotip HW.C1.	- 45 -
Obrázek 5.3 – Tabulka přístroje Proceq s naměřenou tvrdostí materiálu C45.	- 45 -

Obrázek 5.4 – Měření drsnosti povrchu obrobené plochy dotykovým drsnoměrem MarSurft PS10.	- 49 -
Obrázek 5.5 – Proces rovinného frézování.	- 50 -

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 – Změřená geometrie fréz jednotlivých firem.	- 38 -
Tabulka 4.2 – Označení použitých fréz a VBD jednotlivých firem.	- 39 -
Tabulka 4.3 – Technické parametry obráběcího stroje.	- 41 -
Tabulka 5.1 – Vysvětlení doplňkové číslice materiálu.	- 42 -
Tabulka 5.2 – Chemické složení oceli C45 (ČSN 12 050.1).	- 43 -
Tabulka 5.3 – Mechanické vlastnosti uhlíkové oceli C45 (ČSN 12 050.1) – normalizačně žíhaný.	- 43 -
Tabulka 5.4 – Chemické složení oceli C45 (ČSN 12 050.9).	- 43 -
Tabulka 5.5 – Chemické složení oceli X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349).	- 43 -
Tabulka 5.6 – Mechanické vlastnosti korozivzdorné oceli X2CrNiMo17-12-2 (1.4404 / ČSN 17 349).	- 43 -
Tabulka 5.7 – Měření tvrdosti jednotlivých materiálů.	- 45 -
Tabulka 5.8 – Technické parametry přístroje Zoller smarTcheck 450. [28]	- 46 -
Tabulka 5.9 – Axiální kontrola házivosti jednotlivých fréz pro materiál C45.	- 47 -
Tabulka 5.10 – Axiální kontrola házivosti jednotlivých fréz pro materiál X2CrNiMo17-12-2.- 48 -	- 48 -
Tabulka 5.11 – Označení nástroje a VBD jednotlivých výrobců s rozsahem jejich řezných parametrů.	- 50 -
Tabulka 5.12 – Funkční zkouška č.1 pro uhlíkovou ocel C45 s řeznými parametry.	- 51 -
Tabulka 5.13 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 2 pro všechny výrobce.	- 53 -
Tabulka 5.14 – Označení nástroje a VBD jednotlivých výrobců s rozsahem jejich řezných parametrů.	- 54 -
Tabulka 5.15 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 1 pro všechny výrobce.	- 54 -
Tabulka 5.16 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 2 pro všechny výrobce.	- 56 -
Tabulka 5.17 – Řezné parametry funkční zkoušky č. 3 pro všechny výrobce.	- 57 -
Tabulka 5.18 – Funkční zkouška č. 4 pro korozivzdornou ocel X2CrNiMo17-12-2 s řeznými parametry.	- 58 -
Tabulka 6.1 – Ceny jednotlivých fréz a VBD uvedených výrobců.	- 62 -
Tabulka 6.2 – Ceny VBD přepočteny na jeden břit.	- 62 -

Seznam grafů

Graf 5.1 – Poměr drsnosti povrchu Ra.....	- 52 -
Graf 5.2 – Poměr drsnosti povrchu Rz.	- 52 -
Graf 5.3 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.	- 52 -
Graf 5.4 – Poměr drsnosti povrchu Ra.....	- 53 -
Graf 5.5 – Poměr drsnosti povrchu Rz.	- 53 -
Graf 5.6 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.	- 53 -
Graf 5.7 – Poměr drsnosti povrchu Ra.....	- 55 -
Graf 5.8 – Poměr drsnosti povrchu Rz.	- 55 -
Graf 5.9 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.	- 55 -
Graf 5.10 – Poměr drsnosti povrchu Ra.....	- 56 -
Graf 5.11 – Poměr drsnosti povrchu Rz.	- 56 -
Graf 5.12 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.	- 56 -
Graf 5.13 – Poměr drsnosti povrchu Ra.....	- 57 -
Graf 5.14 – Poměr drsnosti povrchu Rz.	- 57 -
Graf 5.15 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.	- 57 -
Graf 5.16 – Poměr drsnosti povrchu Ra.....	- 59 -
Graf 5.17 – Poměr drsnosti povrchu Rz.	- 59 -
Graf 5.18 – Poměr zatížení stroje obráběcím procesem.	- 59 -

Seznam příloh

Příloha č. 1 Tvary třísek vzniklé při experimentálním procesu frézování.